www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

5e JAARGANG NUMMER 10 OCTOBER 1940

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: HET NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

EEN KATHODESTRAALOSCILLOGRAAF VOOR DE WERKTUIGBOUW

door S. L. de BRUIN en C. DORSMAN. 621.317.755 : 621-752

De kathodestraaloscillograaf is niet alleen geschikt voor het opnemen van snel wisselende electrische grootheden, maar kan ook voor het onderzoek van mechanische trillingsverschijnselen worden toegepast. Daar de frequenties van de te onderzoeken mechanische verschijnselen meestal aanzienlijk lager zijn dan die van electrische trillingen, bleek het gewenscht hiervoor een speciale oscillograaf te ontwikkelen, waarvan de versterker en de tijdasafbuiging zoo geconstrueerd zijn, dat de frequentie van een willekeurig verloopend verschijnsel tot ca 1 per/sec kan dalen, zonder dat het oscillogram noemenswaard wordt vervormd. — In dit artikel wordt de kathodestraaloscillograaf GM 3156 beschreven, welke op grond van deze overweging is ontstaan. Na een beschrijving van de versterker en de tijdasgenerator worden enkele toepassingen behandeld.

Een oscillograaf is een instrument, dat dient om snel verloopende verschijnselen zichtbaar te maken of te registreeren. Daar aan de gebruikelijke oscillografen electrische spanningsvariaties moeten worden toegevoerd, heeft men hierbij oorspronkelijk vrijwel uitsluitend gedacht aan electrische verschijnselen. Pas geleidelijk werden hulpapparaten ontwikkeld om snel verloopende mechanische verschijnselen in electrische verschijnselen om te zetten[1]), zoodat de oscillograaf nu ook in de werktuigbouw in steeds ruimere mate ingang kan vinden.

Vergelijkt men de toepassingen van de oscillograaf in de werktuigbouw met die in de electrotechniek, dan zal men groote verschillen vinden, vooral wat de grootste en de kleinste frequenties van de te onderzoeken verschijnselen betreft. In de hoogfrequentietechniek heeft men veelvuldig te maken met golven van weinige meters lengte, dus met trillingstijden van de orde van 10^{-8} sec. Tijden van deze orde van grootte spelen ook een rol bij de niet-periodieke spannings- en stroomveranderingen, welke bijv. optreden tengevolge van doorslag of van een vonk bij het verbreken van een contact [2]).

In de werktuigbouw bestaat daarentegen aan een weergave van dusdanig snel verloopende verschijnselen niet de minste behoefte. De mechanische trillingen van fundamenten enz. worden meestal veroorzaakt door roteerende machines, en hierbij zijn rotatiefrequenties van 3000 omwentelingen per minuut, dus 50 per/sec, reeds als een hooge waarde te beschouwen. Heeft men met stootverschijnselen te maken, dan zijn de door de stoot veroorzaakte trillingen bepaald door de mechanische resonantiefrequenties van de constructie-onderdeelen en practisch altijd in het acoustische gebied gelegen, dwz. niet hooger dan enkele duizenden per/sec.

Een soortgelijk verschil tusschen electrische en mechanische problemen ontmoet men aan de onderste grens van het frequentiegebied, dat bij de weergave moet kunnen worden bestreken. De wisselstroomtechniek werkt in het algemeen met 50 per/sec, lagere frequenties komen zelden voor. In de werktuigbouw zijn echter roteerende machines met 120 omw/min zeer normaal, machines dus, welke een grondfrequentie van 2 per/sec vertoonen. Voor de weergave van deze lage frequenties is de vroeger beschreven kathodestraaloscillograaf (GM 3152) niet geschikt, zoodat de behoefte werd gevoeld om een afzonderlijke oscillograaf voor de werktuigbouw te ontwikkelen.

Het frequentiegebied, waarin de nieuwe kathodestraaloscillograaf, GM 3156, een onvervormd beeld levert, is bij de mechanische toepassingen aangepast. De onderste grensfrequentie van dit gebied bedraagt

[1]) Over het omzetten van mechanische spanningen resp. trillingen in electrische spanningen zie Philips techn. T. 5, 26 resp. 241, 1940.

[2]) De electronenstraal van een kathodestraaloscillograaf is op zichzelf in staat deze snelle verschijnselen te volgen, maar bij de electrische apparatuur van de oscillograaf is hiervan geen sprake. In Philips techn. T. 4, 210, 1939 is uitvoerig uiteengezet, welke maatregelen bij de versterker van de kathodestraaloscillograaf GM 3152 zijn genomen om tot zoo hoog mogelijke frequenties een onvervormde weergave te verkrijgen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

naar gelang van de aard van het op te nemen verschijnsel 0,5 tot 2 per/sec (30 tot 120 perioden per minuut), terwijl de bovenste grensfrequentie ongeveer 10 000 per/sec bedraagt. Bij de vroeger beschreven oscillograaf GM 3152, die vooral voor electrotechnische toepassingen in aanmerking komt, bedroeg de onderste grensfrequentie 10 per/sec en de bovenste grensfrequentie 10^6 per/sec; beide grensfrequenties zijn daar dus aanzienlijk hooger gelegen.

Wij willen in dit artikel bespreken, welke gevolgen de verschuiving van het nuttige frequentiegebied naar beneden heeft gehad voor de constructie van de oscillograaf. Daarna zullen enkele toepassingsvoorbeelden worden besproken.

De versterker

Om de zeer kleine wisselspanningen, welke door het omzetten van wisselende mechanische grootheden in electrische spanningen verkregen worden, op het scherm van een kathodestraalbuis zichtbaar te maken, wordt een versterker met twee trappen toegepast. De ingangsspanning van de tweede trap van deze versterker is afkomstig van de anodestroomwisselingen van de eerste trap. Wanneer men nu tracht een dergelijke versterker geschikt te maken voor het versterken bij zeer lage frequenties, blijkt de moeilijkheid op te treden, dat de langzame, maar soms vrij aanzienlijke anodestroomvariaties, welke bij voeding van de versterker uit het net veroorzaakt worden door schommelingen van de netspanning, eveneens aan de volgende trap worden overgedragen en aanleiding geven tot een vervorming van het oscillogram. Deze moeilijkheid kan echter worden overwonnen door de geheele versterker als balansversterker uit te voeren.

De toepassing van het balansbeginsel lag op zich zelf reeds voor de hand, aangezien, zooals we vroeger hebben uiteengezet, de verticale afbuiging van de kathodestraal het liefst met een gebalanceerde spanning moet geschieden. Derhalve werd ook reeds bij de versterker van de vroeger beschreven oscillograaf de laatste trap in balans geschakeld. De noodzakelijkheid om de invloed van netspanningsvariaties te beperken heeft er echter toe geleid, dat nu ook op de eerste trap van de versterker het balansprincipe werd toegepast.

In *fig. 1* is de gebruikte schakeling weergegeven. Met behulp van eenige regelbare weerstanden kan het van de uitwendig toegevoerde wisselspanning afkomstige ingangssignaal van de buis B_1 continu en in stappen worden gewijzigd. De wisselende anodestroom van deze buis loopt onder meer door de weerstand R_k en geeft daardoor aanleiding tot een dusdanige variatie van de kathodepotentiaal, dat het spanningsverschil tusschen rooster en kathode van de buis kleiner wordt (tegenkoppeling). Tevens ontstaat hierdoor tusschen rooster en kathode van de buis B_1' een ingangsspanning met het tegengestelde teeken. Op deze wijze wordt dus van het begin af een gebalanceerde spanning verkregen. De in tegenfase verloopende wisselspanningen over de anodeweerstanden R_a worden via de conden-

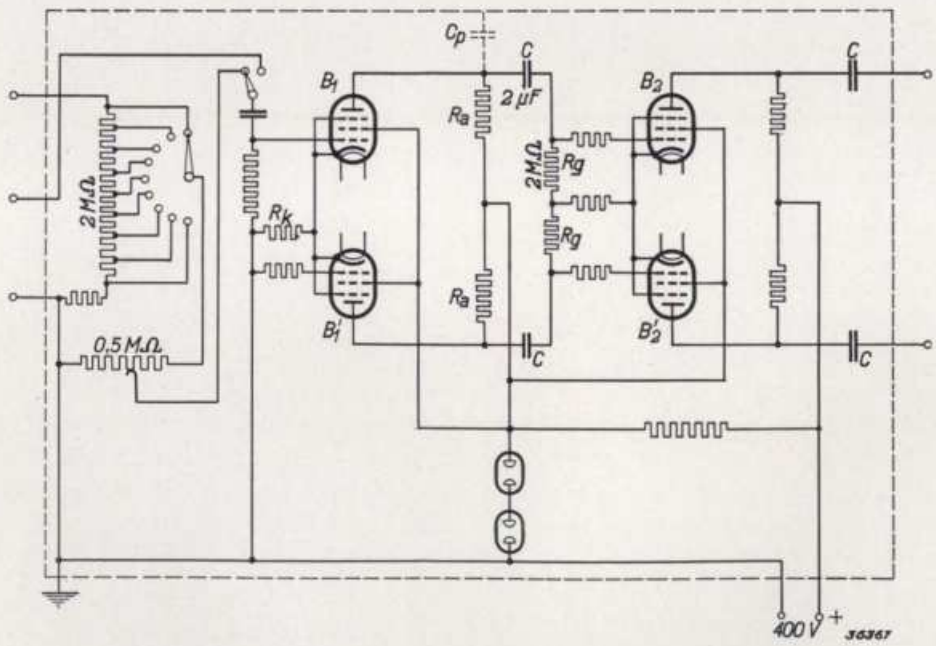


Fig. 1. Schakeling van de versterker voor de kathodestraaloscillograaf GM 3156. Deze bestaat uit twee in balans geschakelde trappen en levert in het frequentiegebied tusschen 0,1 per/sec en 10 000 per/sec een spanningsversterking met een factor 10 000.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

satoren C aan de tweede trap van de balansversterker toegevoerd en opnieuw versterkt, waarbij weer tegenkoppeling wordt toegepast. De uitgangswisselspanning van de tweede trap wordt via twee scheidingscondensatoren toegevoerd aan het eerste, verticaal afbuigende platenstel van de kathodestraalbuis.

Treedt nu een schommeling van de netspanning op, dan zullen de anodespanningen van de buizen B_1, B_1' resp. B_2, B_2' in gelijke fase veranderen en niet in tegenfase, zooals dit geschiedt bij het aanleggen van een ingangssignaal. Een dergelijke spanningsschommeling heeft dus tenslotte de uitwerking, dat beide afbuigplaten dezelfde verandering van de potentiaal ondergaan, zoodat het potentiaalverschil ongewijzigd blijft. De afbuigende kracht op de electronenstraal wordt dus niet gewijzigd; alleen ondergaat de straal een bijkomstige versnelling of remming, hetgeen natuurlijk ook een, zij het dan veel kleinere, verplaatsing van het oscillogram tengevolge heeft. Derhalve is het gewenscht om de spanningsschommelingen zelf eveneens te beperken. Dit kon gedaan worden met behulp van twee in serie geschakelde neonlampen als stabilisatoren, zooals in de schakeling is aangegeven. Het resultaat van deze maatregelen is, dat een plotselinge variatie van de netspanning van 1% in het meest ongunstige geval een verplaatsing van de stip op het scherm van 1,5 mm veroorzaakt en een langzame verandering van de netspanning geen waarneembare gevolgen heeft.

De weergavekarakteristiek van een versterkertrap bij lage en hooge frequenties is in hoofdzaak bepaald door de anodeweerstand R_a, de roosterweerstand R_g, de capaciteit van de scheidingscondensator C en de capaciteit C_p tusschen de koppelelementen en aarde. In het reeds meermalen genoemde artikel over de kathodestraaloscillograaf GM 3152 werd uiteengezet, dat de onderste grens f_1 van het frequentiegebied, waarbinnen de versterking behoorlijk constant is, bepaald is door de conditie:

$$2\,\pi f_1 R_g C = 1, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

terwijl de bovenste grens bepaald is door [3]):

$$2\,\pi f_2 R_a C_p = 1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

In de oscillograaf voor de werktuigbouw is $R_g = 2$ MΩ en $C = 2$ μF gekozen. Men berekent dus volgens verg. (1):

$$f_1 = \frac{1}{2\pi \cdot 2 \cdot 2} = 0{,}04 \text{ per/sec.}$$

De duur van de periode bedraagt dus 25 seconden. De definitie van f_1 in verg. (1) is zoodanig, dat de versterking voor deze grensfrequentie bij de hier toegepaste schakeling slechts 35% van haar waarde in het vlakke gedeelte van de karakteristiek zou bedragen. Stelt men hoogere eischen aan een onvervormde weergave door bijv. te vragen naar het frequentiegebied, waarin de versterking niet meer dan 10% beneden de maximale waarde ligt, dan heeft men in plaats van (1) de vergelijking:

$$2\pi f_1 R_g C = 4 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1a)$$

en berekent dus een onderste grens van 0,17 per/sec (10 per/min).

Bij de vroeger beschreven oscillograaf was de onderste grensfrequentie voor een getrouwe weergave belangrijk hooger, omdat de scheidingscapaciteiten C veel kleiner waren. Een vergrooting van de scheidingscondensatoren was daar in verband met de weergave van hooge frequenties ongewenscht. De scheidingscondensatoren dragen nl. in aanzienlijke mate bij tot de capaciteit C_p, welke volgens verg. (2) de bovenste grens van het vlakke gedeelte van de frequentiekarakteristiek bepaalt. Bij de oscillograaf voor de werktuigbouw is een groote waarde van deze capaciteit geen bezwaar, daar de bovenste grensfrequentie veel lager werd gekozen. Het product $R_a C_p$ in verg. (2) mag een factor 100 grooter zijn dan bij de oscillograaf GM 3152 en hierdoor kon niettegenstaande de grootere waarde van C_p ook de anodeweerstand R_a grooter worden gemaakt, waardoor de versterking in het vlakke gedeelte van de karakteristiek met een factor 6 kon worden opgevoerd. In *fig. 2* is het verloop van de versterking als functie van de frequentie weergegeven.

Men zou kunnen meenen, dat met het uitrekken van het gebied van constante versterking naar lage frequenties overdreven ver is gegaan. Immers, een signaal, dat wisselt met een frequentie van slechts enkele perioden per minuut, kan gemakkelijk met registreerende wijzerinstrumenten worden opgeteekend, zoodat hiertoe geen behoefte bestaat aan een oscillograaf. Het blijkt echter, dat een onvervormde weergave bij deze lage frequenties alleen mogelijk is voor sinusvormige trillingen, terwijl in het geval van niet-sinusvormige trillingen reeds bij belangrijk hoogere frequenties afwijkingen gaan optreden. Dit willen we aantoonen door berekening van de versterking van een rechthoekig verloopend signaal.

[3]) De versterking van een trap is over het grootste gedeelte van het gebied tusschen deze grenzen practisch constant en is bij deze grenzen zelf op $1/\sqrt{2}$ (71%) van zijn constante waarde gevallen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

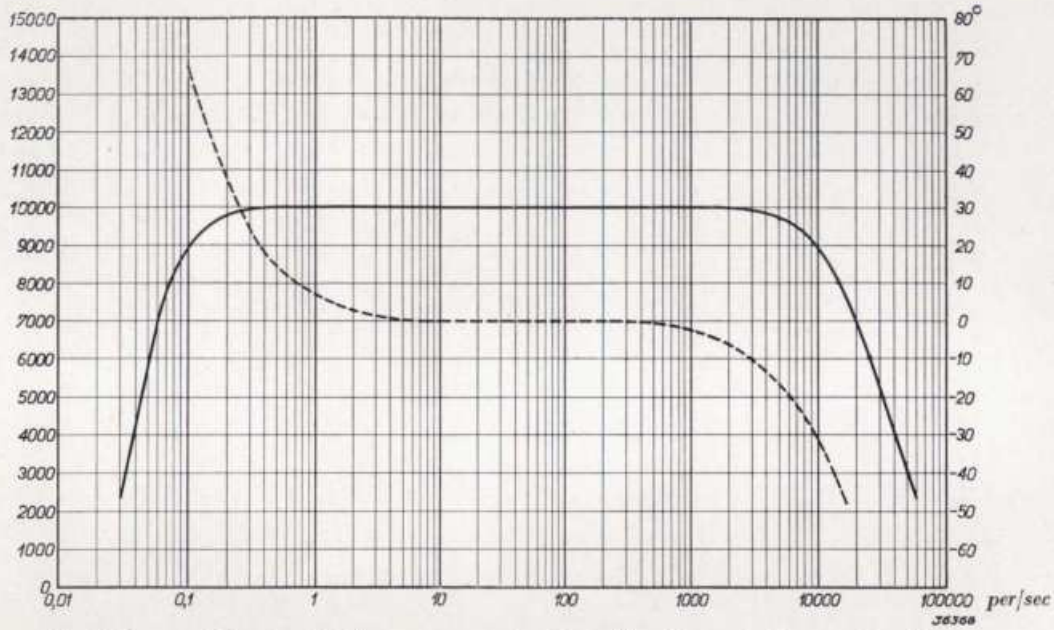


Fig. 2. Frequentiekarakteristiek van de versterker. Getrokken lijn versterking, gestippelde lijn faseverschuiving als functie van de frequentie. Laat men een afname van de versterking met 10% toe, dan loopt het bruikbare weergavegebied van 0,1 per/sec tot 10 000 per/sec. Laat men een faseverschuiving van 5° toe, hetgeen, wat de mogelijke verteekening van een willekeurig oscillogram betreft, ongeveer op hetzelfde neerkomt als de genoemde daling van 10%, dan kan men de versterker slechts in het frequentiegebied van 1,5 per/sec tot 1500 per/sec als bruikbaar beschouwen.

Als schakeling van de versterker kiezen we hiertoe het vereenvoudigde schema volgens *fig. 3*. Wordt een willekeurig verloopende wisselspanning $V(t)$ via de condensator C op de roosterlekweerstand R van de eerste versterkerbuis gezet, dan vindt men voor de spanning V_1 over deze weerstand de differentiaalvergelijking

$$\frac{dV_1}{dt} + \frac{V_1}{RC} = \frac{dV}{dt}.$$

De algemeene oplossing hiervan is

$$V_1 = \left(V_0 + \int_0^t \frac{dV}{dt} e^{t/RC} dt\right) e^{-t/RC} \quad . \quad . \quad (3)$$

Laten we onderstellen, dat de signaalspanning $V(t)$ tot het moment $t = 0$ gelijk nul is, daarna plotseling een bepaalde waarde V_0 aanneemt en verderop eenige tijd constant is. Uit verg. (3) volgt dan

$$V_1 = V_0 e^{-t/RC} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

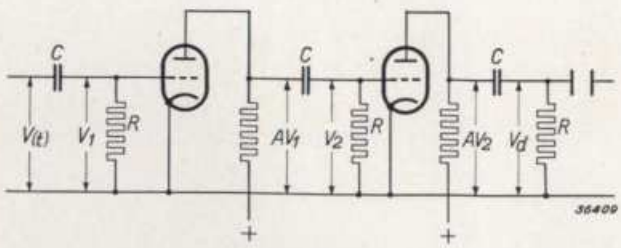


Fig. 3. Vereenvoudigd schema van de versterker.

De uitgangsspanning van de versterkerbuis bedraagt $AV_1(t)$, waarbij A de versterking van de eerste trap is. Deze spanning heeft voor de tweede trap precies dezelfde beteekenis als de spanning $V(t)$ voor de eerste trap, zoodat we voor de stuurroosterspanning van de tweede buis direct kunnen schrijven

$$V_2(t) = \left(AV_0 + \int_0^t A \frac{dV_1}{dt} e^{t/RC} dt\right) e^{-t/RC},$$

waarin V_1 volgens verg. (4) moet worden ingevuld. De uitvoering van de integratie levert:

$$V_2(t) = AV_0 \left(1 - \frac{t}{RC}\right) e^{-t/RC} \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Deze spanning wordt in de tweede trap weer met een factor A versterkt en weer via een condensator C op een weerstand R gezet; van deze weerstand wordt de uiteindelijke deflectiespanning afgenomen. De deflectiespanning V_d kan men dus weer volgens verg. (3) berekenen, waarbij men $V = AV_2$ moet stellen. Men vindt dan

$$V_d(t) = A^2 V_0 \left(1 - \frac{2t}{RC} + \frac{t^2}{2R^2C^2}\right) e^{-t/RC}. \quad (6)$$

Wij zien dus, dat de spanningsstoot V_0 op het eerste moment met een factor A^2 versterkt naar de afbuigplaten wordt overgebracht. In plaats van constant te blijven neemt de spanning daarna echter exponentieel af. (Hierbij treedt nog een

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

slingering op, zooals men ziet in *fig. 4*, waarin het berekende spanningsverloop is weergegeven.) Beschouwen we betrekkelijk korte tijden ($t \ll RC$), dan kunnen we het verloop van de spanning be-

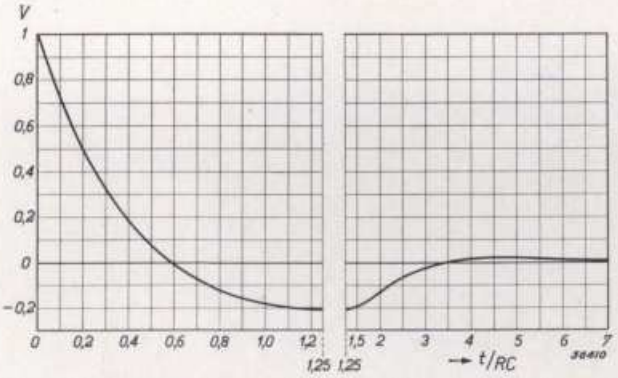


Fig. 4. Verloop van de spanning op de deflectieplaten als functie van de tijd bij een inschakelstoot, zie verg. (6).

naderen, door de eerste term van de reeksontwikkeling der e-functie te nemen en verkrijgen dan:

$$V_d \approx A^2 V_0 \left(1 - \frac{3t}{RC}\right).$$

Voor een getrouwe weergave zal men moeten eischen, dat dit een eenigszins constante spanning is, immers de bijbehoorende ingangsspanning is constant. Staat men toe, dat V_d 10% afneemt, dan volgt voor de tijd t een maximale waarde

$$t_m = \frac{1}{30} RC\,.$$

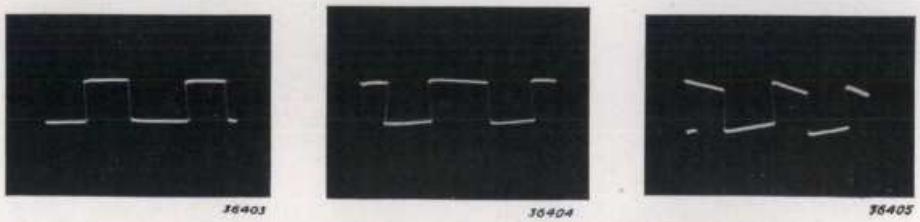
Langer dan t_m mag de ingangsspanning niet constant blijven, wil men geen ontoelaatbare vervorming doen optreden. Drukt men RC uit door de onderste grensfrequentie volgens verg. (1a), dan vindt men:

$$t_m = \frac{1}{15\pi f_1} = \frac{1}{47 f_1}\,.$$

De maximale duur van een inschakelstoot, welke met een behoorlijke getrouwheid wordt weergegeven, is dus 47 maal korter dan de maximale periodenduur van een sinusvormige kromme, welke met dezelfde nauwkeurigheid wordt afgebeeld. Voor een rechthoekig verloopende wisselspanning, welke beschouwd kan worden als een opeenvolging van inschakelstooten, gelden in wezen dezelfde beschouwingen als voor een enkele inschakelstoot; de duur van één periode van de vierkante sinus bedraagt dan $2t_m$. Een goede weergave van sinusvormige trillingen tot een onderste grens van 0,17 per/sec komt dus overeen met een goede weergave van rechthoekig verloopende trillingen („vierkante sinussen") tot een onderste grens van $47 \cdot 0{,}17/2 = 3{,}75$ per/seconde. Wij zien dus, dat bij beschouwing van niet-sinusvormige trillingen het gebied van onvervormde weergave geenszins tot overdreven lage frequenties is uitgestrekt. Hoe dit in de practijk tot uiting komt, zien we in de volgende oscillogrammen.

In *fig. 5* zijn een drietal beeldkrommen van vierkante sinussen weergegeven. Het diagram *a* werd verkregen door de spanning, die een frequentie had van 2 per/sec, rechtstreeks aan de afbuigplaten van de kathodestraalbuis toe te voeren. Het diagram *b* laat zien, dat dit verloop door de versterker nog zonder al te groote vervorming kan worden weergegeven. Tenslotte ziet men uit het diagram *c*, dat dit bij aanzienlijk lagere frequenties niet meer het geval is; bij een frequentie van 0,5 per/sec vertoont het oscillogram in plaats van de horizontale stukken exponentieel afvallende lijnen, dus een sterke vervorming, hoewel bij deze frequentie nog geen merkbare afname van de versterking optreedt.

Dat de vierkante sinus van lage frequentie zoo veel slechter weergegeven wordt dan de zuivere sinus, lijkt wel eenigszins paradoxaal; immers, men kan de vierkante sinus opvatten als samengesteld te zijn uit een zuivere sinus en hoogere harmonischen daarvan, en wanneer de component met de laagste frequentie nog niet aanmerkelijk wordt verzwakt, is dit bij de hoogere harmonischen beslist niet



a *b* *c*

Fig. 5. Oscillogrammen van een rechthoekig wisselende spanning.
a) De te onderzoeken spanning (vierkante sinus van 2 per/sec) is rechtstreeks op de verticaal afbuigende platen van de kathodestraalbuis gezet.
b) Dezelfde spanning is aan de kathodestraalbuis toegevoerd via de versterker. Practisch resulteert hetzelfde diagram.
c) De frequentie van de vierkante sinus is verlaagd tot 0,5 per/sec. Men ziet nu een duidelijke vervorming van het oscillogram.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

het geval. Men moet echter bedenken, dat door het versterken van een samengestelde trilling niet alleen de onderlinge amplituden van de harmonischen kunnen veranderen, maar ook de onderlinge fasen, en dit laatste effect treedt reeds bij aanzienlijk hoogere frequenties op dan het eerstgenoemde, zooals men ziet uit de in fig. 2 gestippeld weergegeven kromme. Door het verstoren van de onderlinge fasen kan de som van twee trillingen in het uitgangssignaal een geheel andere vorm krijgen, dan de oorspronkelijke trilling bezat, ook al is de verhouding van de amplituden door het versterken niet gewijzigd.

Behalve vervormingen tengevolge van een met de frequentie veranderlijke versterking en vervormingen tengevolge van een met de frequentie veranderlijke faseverschuiving bezit een versterker in het algemeen ook een zg. niet-lineaire vervorming, hetgeen beteekent, dat een sinusvormig ingangssignaal niet leidt tot een precies sinusvormig uitgangssignaal. De afwijking van de sinusvorm neemt toe met de amplitude van het ingangssignaal en bedraagt bij de versterker van de hier beschouwde kathodestraaloscillograaf in het ongunstigste geval, nl. bij een signaal, overeenkomende met een beeldhoogte van 6 cm, ongeveer 2%. Deze afwijking is op het scherm van de buis nauwelijks te constateeren en mag dus als toelaatbaar worden beschouwd.

De tijdasgenerator

De tijdasgenerator heeft de taak een spanning te leveren, die evenredig is met de tijd en die plotseling, telkens wanneer een bepaalde maximale waarde is bereikt, op haar beginwaarde terugvalt, zoodat een zaagtandvormig verloop wordt verkregen (*fig. 6*). Zet men deze spanning op de horizontaal afbuigende platen van de kathodestraalbuis en tevens op de verticaal afbuigende platen de spanning van het op te nemen verschijnsel, dan ziet men op het scherm van de buis een diagram, dat de op te nemen grootheid als functie van de tijd voorstelt.

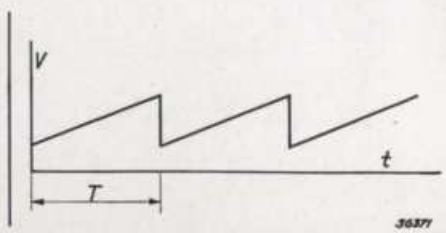


Fig. 6. Verloop van de horizontaal afbuigende spanning, opgewekt door de tijdasgenerator, als functie van de tijd. Bij een amplitude van de horizontale afbuiging van 8 cm kan de „zaagtandperiode" T gevarieerd worden van 0,0005 sec tot 4 sec.

De snelheid van de zaagtandbeweging moet aangepast kunnen worden aan de frequentie van het op te nemen verschijnsel. Dit beteekent, dat ook het gebied, waarbinnen de frequentie van de zaagtandbeweging gevarieerd kan worden, bij de oscillograaf voor de werktuigbouw aanzienlijk lager gekozen moet worden dan bij de kathodestraaloscillograaf GM 3152. Het periodiek terugspringen van de spanning kan hier zeer eenvoudig verwezenlijkt worden met behulp van gastrioden, die in de vroeger beschreven oscillografen niet konden worden toegepast, omdat ze te traag werkten voor de hoogste in deze oscillografen optredende tijdasfrequenties van meer dan 100 000 per/sec. Voor de maximale tijdasfrequenties van de kathodestraaloscillograaf voor de werktuigbouw zijn echter gastrioden nog zeer goed te gebruiken. Bovendien biedt de met gastrioden verkregen schakeling van de zaagtandgenerator groote voordeelen, wanneer men tot een veel lagere onderste grensfrequentie wil overgaan, dan bij de bestaande oscillografen het geval is.

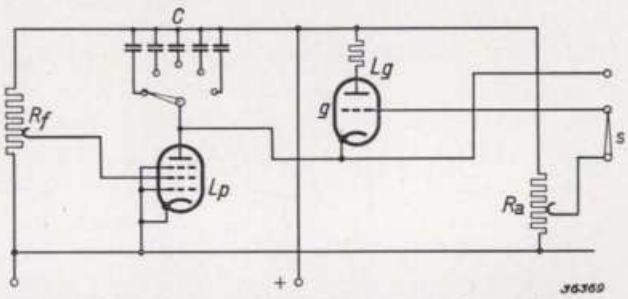


Fig. 7. Schakeling van de tijdasgenerator. L_p penthode, L_g gastriode. Door veranderen van de capaciteit C en instellen van de potentiometer R_f wordt de zaagtandfrequentie geregeld; met behulp van de potentiometer R_a wordt de zaagtandamplitude ingesteld.

In *fig. 7* is de gebruikte schakeling aangegeven. De penthode L_p laadt met een constante stroomsterkte de condensator C, waardoor de kathodepotentiaal van de gastriode L_g evenredig met de tijd daalt. Tusschen de kathode en de anode van de gastriode treedt hierdoor een spanningsverschil op, dat aanleiding zal geven tot doorslag, zoodra het een bepaalde waarde overschrijdt. Deze waarde is in hoofdzaak bepaald door de vóórspanning van het rooster g. De doorslag treedt ongeveer dan op, wanneer de potentiaal van de kathode beneden die van het rooster is gedaald. Tengevolge van de doorslag wordt de condensator C met groote stroomsterkte ontladen, zoodat de kathodepotentiaal weer zeer snel tot haar beginwaarde toeneemt; hierdoor dooft de ontlading van de gastriode, en het spel begint daarna opnieuw.

Door omschakelen van de condensator C kan men de frequentie van de tijdasspanning stapsgewijze

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

binnen wijde grenzen beïnvloeden, terwijl een continue regeling mogelijk is door met behulp van de potentiometer R_f de schermroosterspanning van de penthode L_p te veranderen en op deze wijze de laadstroom van de condensator C te regelen. De amplitude van de zaagtandbeweging wordt ingesteld met de potentiometer R_a, waarvan de gelijkspanning voor het rooster g van de gastriode wordt afgenomen. Tenslotte is het mogelijk om de periode van de zaagtandspanning te synchroniseeren met behulp van een uitwendig toegevoerde spanning, welke in plaats van de kortsluiting tusschen de aansluitklemmen s, dus op het rooster van de gastriode wordt gezet. Hiertoe kan men ook de spanning van het te onderzoeken verschijnsel zelf gebruiken, welke van de uitgang van de versterker wordt afgenomen.

Wenscht men niet-periodieke verschijnselen, bijv. inschakelverschijnselen, op te nemen, dan gebruikt men in vele gevallen met voordeel in plaats van de oscilleerende zaagtand-afbuiging een slechts éénmaal op een geschikt moment beginnende eenparige horizontale afbuiging van de fluorescentievlek. Deze kan men verkrijgen door vóór het begin van de eenparige beweging het rooster van de gastriode op een zoo hooge spanning te zetten, dat de ontlading nooit dooft en de condensator C vrijwel geheel ongeladen blijft. Op het moment, waarop het te onderzoeken verschijnsel begint, zet men met een geschikte synchroniseerinrichting, bijv. een mechanisch aangedreven contact, de normale spanning op het rooster van de gastriode. Op dat moment dooft de ontlading en de fluorescentievlek begint zijn eenparige beweging. Na een bepaalde weg te hebben afgelegd, zal de vlek naar de beginstand terugspringen en zijn beweging opnieuw beginnen. Het mechanisch aangedreven contact zal men daarom het liefst zoodanig inrichten, dat, vóór deze eerste periode van de zaagtand is afgeloopen, het rooster weer op hooge spanning wordt gebracht, zoodat de vlek terugspringt en verder in zijn ruststand blijft staan.

Door verschuiven van het sleepcontact op de weerstand R_f en omschakelen van de condensator C kan de snelheid van de eenparige beweging van de vlek tusschen 2 cm/sec en 16 000 cm/sec continu resp. in stappen worden geregeld. Voor de zaagtandbeweging beteekent dit bij een lengte van de tijdbasis van 8 cm een variatie van de tijdasfrequentie tusschen $^1/_4$ en 2000 per/sec.

De kathodestraalbuis

De oscillograaf voor de werktuigbouw wordt voorzien van de kathodestraalbuis DN 9-3 of van de naversnellingsbuis DN 9-5, welke in de vorige aflevering van dit tijdschrift uitvoerig werd behandeld [4]). De kathode van de buis staat op een potentiaal, die 1000 V negatief is ten opzichte van aarde, terwijl de ruimte tusschen de afbuigplaten ongeveer aardpotentiaal heeft, zoodat een te onderzoeken spanning ten opzichte van aarde ook rechtstreeks, dwz. zonder gebruik van de versterker, op de platen van de kathodestraalbuis kan worden aangesloten. De electronen, welke de afbuigende systemen hebben gepasseerd, kunnen bij toepassing van de naversnellingsbuis, zooals in het aangehaalde artikel uitvoerig werd beschreven, een tweede keer worden versneld door middel van een positieve spanning op de naversnellingselectrode. Hiervoor bestaat een speciaal voedingsapparaat (GM 4198), dat een regelbare hooge gelijkspanning ten opzichte van aarde kan leveren (zie *fig. 8*). De hoogste spanning, welke op de naversnellingselectrode mag worden gezet, bedraagt 4000 V ten opzichte van aarde (5000 V ten opzichte van de kathode).

Fig. 8. Het 5000-V-voedingsapparaat GM 4198 voor de naversnellingsbuis van de kathodestraaloscillograaf GM 3156. Het apparaatje bevat een hoogspanningstransformator, een gelijkrichterbuis en een filter om de verkregen gelijkspanning te vereffenen. Zooals men ziet, kan het met behulp van een schakelaar op vijf verschillende spanningen worden ingesteld.

Door het sterkere versnellen van de electronen verkrijgt het beeld een veel grootere helderheid, zoodat het fotografisch opnemen van het oscillogram zelfs met eenvoudige camera's met betrekkelijk kleine openingsverhouding mogelijk is, terwijl tevens de mogelijkheid ontstaat om het beeld te projecteeren en daardoor voor een grooter gehoor zichtbaar te maken. Hiertoe dient een projectievoorzetapparaat (GM 4199) met een lens van 50 mm diameter en 150 mm brandpuntsafstand. De afstand van het projectiescherm kan 1 tot 5 m bedragen, waarbij een vergrooting met een factor 6 tot 30 wordt verkregen.

[4]) Een kathodestraalbuis met naversnelling, Philips techn. T. **5**, 257, 1940.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

Eenige toepassingen

De oscillograaf voor de werktuigbouw zal hoofdzakelijk worden toegepast om trillingsverschijnselen en snel wisselende spanningen in machine-onderdelen te onderzoeken. Daar deze gebieden reeds vroeger uitvoerig behandeld werden [5]), willen wij hier slechts ingaan op eenige minder voor de hand liggende toepassingen.

Metingen aan roteerende deelen

Met behulp van een spoeltje en een permanent magnetische kern kan op zeer eenvoudige wijze de rondheid van assen en vliegwielen worden onderzocht. In *fig. 9* is een hiervoor gebruikte opstelling schematisch aangegeven, terwijl *fig. 10* een foto van de opstelling laat zien. De ijzeren as *A* draait op bijv. 1 mm afstand van de magneet *M* met de spoel *S*. Indien de luchtspleet *L* tusschen as en magneet in breedte varieert, zal in de spoel *S* een spanning geïnduceerd worden, welke evenredig is met de snelheid van de breedteverandering. Wanneer de as zuiver rond en gecentreerd is en onder het draaien niet trilt, zal de geïnduceerde spanning gelijk nul zijn. Het oscillogram wijst dus, naar gelang van zijn vorm, op onrondheid, excentriciteit of mechanische trillingen.

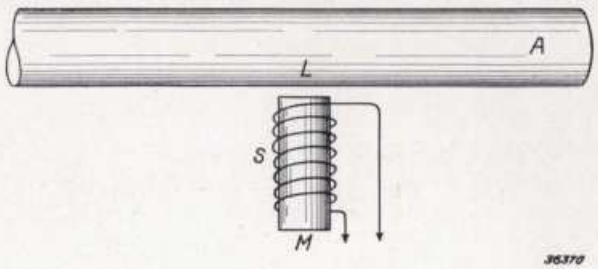


Fig. 9. Opstelling voor het meten van de onrondheid en excentriciteit van assen. *A* as, *L* luchtspleet, *S* spoel, *M* permanente magneet. De variatie van de luchtspleet door onrondheid en excentriciteit wekt in de spoel een wisselende spanning op.

Fig. 11 geeft een voorbeeld, opgenomen aan een as met een toerental van 1000 omw/min en een diameter van 50 mm. We onderscheiden in beeld *a* spanningswisselingen, veroorzaakt door kleine oneffenheden en een excentriciteit. In beeld *b* is hetzelfde te zien voor een as met een ruwer oppervlak.

De frequentie van de trilling, welke door de excentriciteit wordt veroorzaakt, bedraagt in dit geval $16^2/_3$ per/sec, zoodat de vroeger beschreven oscillograaf, welke tot een onderste grens van 10 per/sec een practisch constante versterking levert,

[5]) Zie de in noot [1]) genoemde artikelen.

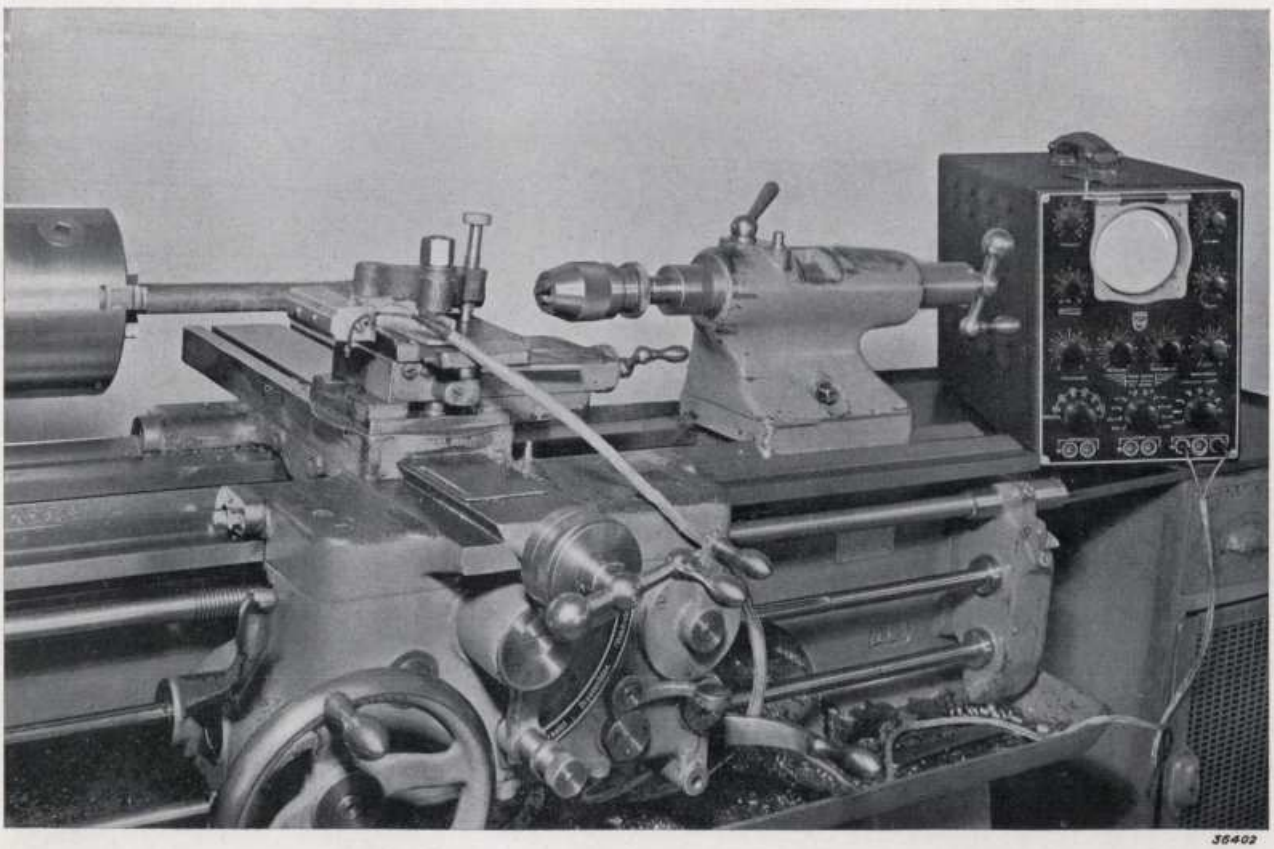
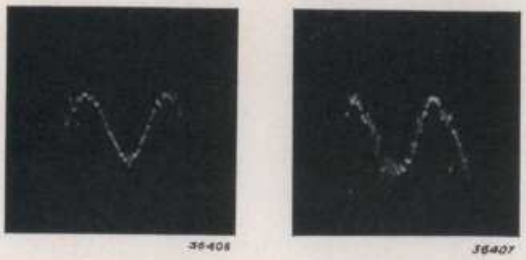


Fig. 10. Opstelling voor het meten van de onrondheid van assen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

deze excentriciteit eveneens nog practisch onvervormd zou kunnen aanwijzen. Het gebruik van de oscillograaf voor de werktuigbouw heeft echter het voordeel, dat hiermede ook de fase van de excentriciteit nog geheel juist wordt weergegeven, immers boven 4 per/sec is de fase-afwijking kleiner dan 1°.



a *b*

Fig. 11. Twee oscillogrammen, verkregen met een opstelling volgens fig. 9. De sinusvormige trilling wijst op een exentriciteit, terwijl de karteling, welke in het geval *b* sterker is dan in geval *a*, door onregelmatigheden van het oppervlak wordt veroorzaakt.

Fasemetingen bij lage frequenties zijn niet alleen in de werktuigbouw van beteekenis, maar ook in de electrotechniek, in het bijzonder bij de constructie van tegengekoppelde versterkers. Is de uitgangsspanning van de versterker grooter dan 10 volt, dan kan deze direct op het horizontaal afbuigende platenstel van de kathodestraalbuis worden gezet, terwijl het ingangssignaal via de versterker van de oscillograaf de verticale afbuiging van de kathodestraal veroorzaakt. Zijn uitgangsspanning en ingangsspanning onderling in fase of in tegenfase, dan ontstaat een rechte lijn; in andere gevallen ontstaat een ellips, waaruit men de onderlinge faseverschuiving kan aflezen [6]).

Het meten van wisselende windsnelheden

In de aerodynamica worden windsnelheden of stroomingssnelheden in turbulente (wervelende) luchtstroomen gemeten uit de afkoeling, die dunne verhitte draadjes in de lucht ondervinden. De temperatuurwisselingen van het draadje hebben weerstandsvariaties tengevolge, die gemakkelijk omgezet kunnen worden in spanningsvariaties. Deze laatsten kunnen worden waargenomen met een oscillograaf.

Fig. 12. Weerstandsvariatie van een anemometerdraadje in de windstroom achter een ventilator.

Een voorbeeld van de zoo verkregen diagrammen geeft het in *fig. 12* opgenomen oscillogram, dat opgenomen is in de windstroom achter een ventilator. Daar deze strooming geen periodiek karakter heeft, is hierbij de éénmalige horizontale afbuiging toegepast. Het beginpunt van de horizontale beweging is links als een witte verticale lijn gemarkeerd.

In de volgende afleveringen van dit tijdschrift hopen we nog verdere voorbeelden te kunnen beschrijven van toepassingen van de kathodestraaloscillograaf GM 3156 in de practijk.

[6]) Over deze en andere methoden om fasemetingen met behulp van de kathodestraalbuis uit te voeren zie Philips techn. T. **5**, 210, 1940.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

DE TOONHOOGTEGEWAARWORDING

door J. F. SCHOUTEN. 534.321

Hoewel het menschelijk oor bij het beluisteren van een samengestelde klank in staat is deze in harmonischen te ontleden — van physiologisch standpunt te begrijpen door de zg. localisatietheorie —, wordt het oor bij oppervlakkig luisteren slechts één toonhoogte gewaar, die in het algemeen gelijk is aan die van de grondtoon. Dat dit heel vaak ook dan het geval is, wanneer de grondtoon vrijwel of geheel ontbreekt, heeft men willen verklaren door de niet-lineaire vervorming in het oor. Proeven, in dit laboratorium gedaan, hebben aangetoond, dat deze verklaring niet juist kan zijn, en hebben geleid tot de hypothese, dat de waargenomen lage toonhoogte te wijten is aan een gezamenlijke gewaarwording van de hoogere harmonischen. Deze klankcomponent werd het „residu" genoemd. De lage toonhoogte van dit residu blijkt gecorreleerd te zijn met de periodiciteit der trilling, welke door samenvoegen der hooge harmonischen ontstaat. Het is physiologisch begrijpelijk, dat een dergelijk samenvoegen plaats vindt, gezien het beperkte oplossend vermogen van het oor. Dit wordt aan de hand van een model verduidelijkt. Tenslotte worden eenige, deels reeds lang bekende, verschijnselen besproken, die door de hypothese van het residu een eenvoudige verklaring vinden; vooral wordt daarbij ingegaan op de klank der torenklokken.

Subjectieve klankanalyse

Iedere periodieke luchttrilling is te ontleden in een som van een aantal sinusvormige trillingen (harmonischen), welker frequenties geheele veelvouden van een grondfrequentie zijn (Fourier-reeks). Is alleen de grondfrequentie aanwezig en ligt deze in het hoorbare gebied, dan neemt het oor de luchttrilling waar als een zuivere toon, waarvan de toonhoogte bepaald is door de frequentie. Bevat de trilling behalve de grondfrequentie nog een aantal harmonischen, dan treden andere gewaarwordingen op. In het algemeen neemt men dan een klank waar, waaraan men één bepaalde toonhoogte toekent en die zich van een zuivere toon met dezelfde toonhoogte onderscheidt door een bepaald timbre. Na eenige oefening blijkt het echter vaak mogelijk, in het geluid de verschillende harmonischen ook afzonderlijk als zuivere tonen waar te nemen door de aandacht sterk op de verschillende te hooren componenten te concentreeren. Dat het oor tot een dergelijke Fourier-analyse in staat is, werd reeds een eeuw geleden uitgesproken door Ohm (zijn zg. acoustische wet).

Het analyseerend vermogen van het oor kan op eenvoudige wijze op de proef worden gesteld met behulp van de piano. We slaan bijv. de noot c aan (grondfrequentie 131 per/sec). Behalve de grondtoon ontstaat dan een reeks harmonischen, waarvan de frequenties (althans tennaastebij) overeenkomen met de grondfrequenties van andere noten op de piano. Deze noten zijn voor de eerste tien harmonischen van de c in *fig. 1* weergegeven. Dat deze harmonischen inderdaad door de snaar c worden voortgebracht, kan objectief worden aangetoond door eerst een, met één der harmonischen correspondeerende, toets, bijv. g′ (derde harmonische van c) geluidloos neer te drukken en vervolgens de toets c krachtig aan te slaan. Bij loslaten van de toets c hoort men de snaar g′, die door de aanwezigheid van de derde harmonische in resonantie is gebracht, duidelijk verder klinken.

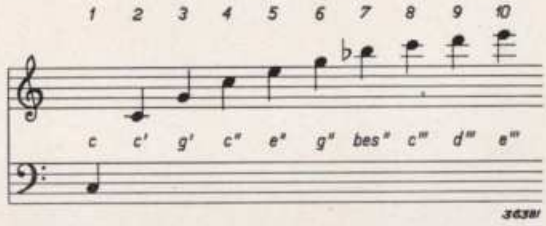


Fig. 1. De harmonischen van een noot op de piano komen tennaastebij overeen met de grondtonen van andere noten. Deze zijn hier voor de eerste tien harmonischen van c aangegeven.

Om nu de derde harmonische in de noot c ook subjectief waar te nemen is het een goed hulpmiddel de genoemde toets g′ tevoren even zacht aan te slaan (om de aandacht op die toon te concentreeren), deze weer los te laten en vervolgens de toets c aan te slaan. Ditzelfde kan men ook nog voor eenige hoogere harmonischen, tot ongeveer de achtste, doen. Lukt het eenmaal de harmonische waar te nemen, dan is deze veelal zoo verrassend duidelijk, dat men eerder geneigd zou zijn een meetrillende snaar voor het geluid verantwoordelijk te stellen.

Dat men niet te maken heeft met een meetrillende snaar is op elegante wijze als volgt aan te toonen. De vijfde harmonische van de c is de natuurlijke groote terts van de c″, immers dit interval is gekenmerkt door de frequentieverhouding 5 : 4 = 1,250. In de gelijkzwevende stemming van de piano ligt de groote terts echter iets hooger ($2^{4/12} = 1{,}260$), zoodat men de vijfde harmonische van de c een fractie lager moet hooren

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

dan de e'' (terts van c''). Inderdaad is dit het geval. Ook hoort men, wanneer men de c en de e'' tezamen aanslaat, met name bij het wegsterven van het geluid de e'' duidelijk zweven met een frequentie van 5 per/sec, overeenkomende met het verschil in frequentie der beide tonen.

Deze proeven illustreeren, hoe de harmonischen van een snaartrilling door het oor worden waargenomen als afzonderlijke zuivere tonen, ieder met de bij zijn frequentie behoorende toonhoogte. Wat nu het mechanisme betreft, volgens hetwelk het oor in staat zou zijn een dergelijke Fourieranalyse uit te voeren, heeft men de volgende hypothese ontwikkeld. In de cochlea (het zoogenaamde slakkenhuis in het binnenoor) bevindt zich een vlies, het basilair membraan; zie de schematische voorstelling in *fig. 2*. Door een geluids-

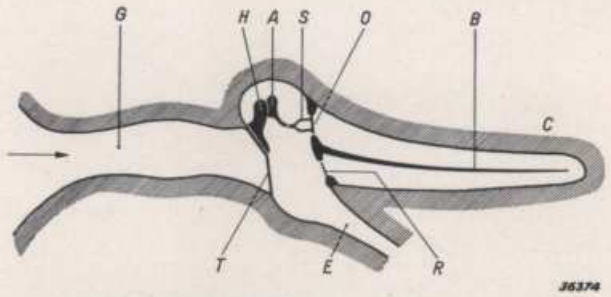


Fig. 2. Schematische voorstelling van het binnenoor. *G* gehoorgang, *T* trommelvlies, *C* cochlea. De ruimte van dit orgaan wordt door het basilair membraan *B* in een onderste en een bovenste gedeelte gescheiden. In werkelijkheid is de hier langgerekt geteekende ruimte spiraalvormig opgerold (slakkenhuis). De gehoorbeentjes (hamer *H*, aambeeld *A*, stijgbeugel *S*) grijpen op het zg. ovale venster *O* in het bovenste gedeelte der cochlea aan. Het onderste gedeelte heeft een door een vlies afgesloten rond venster *R*, dat uitmondt in de buis van Eustachius *E*.

trilling van bepaalde frequentie vindt nu in de cochlea een locale prikkeling plaats, in dien zin, dat slechts een bepaald, meer of minder beperkt, gebied van het basilair membraan in beweging wordt gebracht, en dat alleen de van dit gebied uitgaande vezels van de gehoorzenuw worden geprikkeld. Een fraaie bevestiging heeft deze oude en veel omstreden localisatietheorie gevonden in dier-proeven, waarbij men de electrische spanningen onderzocht, welke onder invloed van geluid in het slakkenhuis ontstaan en ten deele naar de buitenzijde daarvan weglekken. Het bleek daarbij, dat, met name voor hooge tonen, het maximum der spanning afhankelijk van de frequentie op verschillende punten van het slakkenhuis viel waar te nemen.

Onderstelt men nog, wat vaak stilzwijgend wordt gedaan, dat ieder der zenuwvezels bij prikkeling de gewaarwording van een bepaalde toonhoogte teweeg zal brengen, dan is daarmede een physiologische verklaring voor de subjectieve klankanalyse volgens de wet van Ohm gegeven: een samengestelde klank brengt smalle gebieden van het basilair membraan, bepaald door het Fourierspectrum van de klank, in trilling en ieder dezer gebieden geeft de gewaarwording van een aparte toon met een door dat gebied bepaalde toonhoogte.

Hiermede hebben we in korte trekken de gangbare opvattingen over de subjectieve klankanalyse geschetst. Onderzoekingen, die we thans zullen beschrijven, leidden ons tot de conclusie, dat deze opvattingen een wezenlijke wijziging behoeven. Met behulp van een verbeterde formuleering der subjectieve klankanalyse vinden bovendien een aantal reeds langer bekende paradoxale verschijnselen op het gebied der toonhoogtegewaarwording een gereede verklaring. Hierop zullen we aan het slot nog ingaan.

Het probleem van de ontbrekende grondtoon

We vermeldden reeds, dat bij het waarnemen van een uit verschillende harmonischen bestaande klank het oor in het algemeen geen gebruik maakt van zijn analyseerend vermogen, maar slechts de indruk van een klank met bepaalde toonhoogte en timbre gewaar wordt. Dit is bijv. ook het geval, wanneer men een noot op de piano aanslaat, zonder de aandacht speciaal op één der harmonischen te concentreeren. De aan de klank toegekende toonhoogte komt dan eenvoudig overeen met de grondtoon van de noot, hetgeen ook begrijpelijk is, aangezien de grondtoon bij de piano meestal sterker is dan de mede opgewekte harmonischen.

Toen de studie der geluidspectra verder voortgang maakte, kwam men tot de ontdekking, dat bij vele klanken de grondtoon slechts zeer zwak aanwezig is. Dit geldt bijv. voor de klinker A en

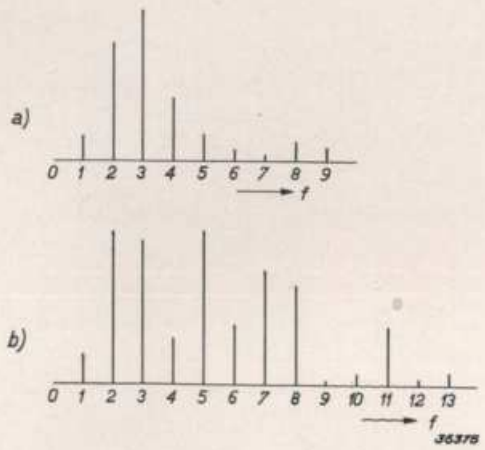


Fig. 3. *a*) Spectrum der harmonischen van de klinker A, gezongen met een toonhoogte 290 per/sec.
b) Hetzelfde voor de in g gestreken g-snaar van de viool.
In beide gevallen is de grondtoon slechts zwak aanwezig.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

voor de klank van de in g gestreken g-snaar op de viool [1]), zie *fig. 3*. Desondanks kennen we ook hieraan de toonhoogte van de grondtoon toe en komen we geenszins in de verleiding, de toonhoogte een octaaf of een duodecime hooger (d.i. dan namelijk de sterkste component van het spectrum) te schatten.

Nog treffender trad dit merkwaardige gedrag van het oor aan den dag bij de telefonie. Het bleek hier, dat zonder verandering van de hoogte der stem van den spreker het geheele frequentiegebied beneden 300 per/sec kan worden afgesneden. In dit gebied liggen echter juist de grondtonen van de mannelijke spreekstem en voor een deel ook die der vrouwelijke spreekstem; zie *fig. 4*.

De verklaring voor het feit, dat in deze gevallen ondanks het ontbreken van de grondtoon toch aan de klank de toonhoogte van de grondtoon wordt toegekend, heeft men willen zien in de niet-lineaire vervorming, die de geluidstrillingen bij de overbrenging in het menschelijk oor ondergaan [2]). Door deze vervorming zullen namelijk o.a. verschiltonen der in het geluid aanwezige componenten ontstaan. Ieder paar naburige harmonischen zal juist een verschiltoon geven met een frequentie gelijk aan de grondtoon (zie bijv. de spectra in fig. 3). Zoo zou het dus mogelijk zijn, dat een klank, welke objectief (dwz. buiten het oor) de grondtoon mist, deze in het binnenoor wel bevat. Zou dit verschijnsel werkelijk sterk uitgesproken zijn, dan zou het zelfs onverschillig worden of een klank de grondtoon objectief al dan niet bevat; steeds immers zou de door niet-lineaire vervorming ontstane subjectieve grondtoon overheerschend zijn.

Tegen deze verklaring is reeds aan te voeren, dat het bij de niet-lineaire vervorming een verschijnsel betreft, dat bij voldoend laag geluidsniveau noodzakelijk moet verdwijnen, terwijl het te verklaren verschijnsel — het gewaarworden van de toonhoogte van de ontbrekende grondtoon — bij laag

Fig. 4. Gebied van de grondtonen *a*) van de mannelijke, *b*) van de vrouwelijke spreekstem. Bij de telefonie (frequentiegebied *c*) worden de grondtonen van de man nooit, die van de vrouw slechts voor de hooge stemmen mee overgebracht.

niveau blijft bestaan. Geheel ontzenuwd wordt de verklaring echter door proeven met de optische sirene, een instrument, dat we reeds eerder in dit tijdschrift hebben beschreven [3]). Met dit instrument, waarvan in *fig. 5* een afbeelding en in het bijbehoorende onderschrift een korte beschrijving is gegeven, heeft men de mogelijkheid om een reeks willekeurige trillingsvormen, die in mallen worden uitgesneden, afzonderlijk of tezamen in geluid om te zetten; in het bijzonder kan men tijdens het beluisteren van het aldus verkregen „synthetische

[1]) Zie ook: Philips techn. T. **4**, 303, 1939, fig. 8 en 9.

[2]) De niet-lineaire vervorming in het oor is nader besproken in: J. F. Schouten, Synthetisch geluid, Philips techn. T. **4**, 176, 1939; zie speciaal pag. 182.

[3]) Zie het in noot [2]) aangehaalde artikel.

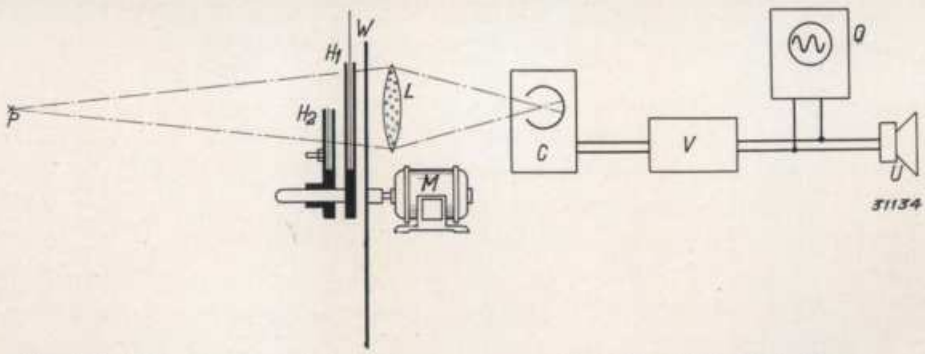


Fig. 5. Optische sirene voor het voortbrengen van „synthetisch geluid". Een trillingsvorm, die men in geluid wil omzetten, wordt uitgesneden in een papieren mal (dergelijke mallen zijn in fig. 6 links te zien), in een houder H_1 geplaatst en door een op groote afstand opgestelde puntvormige lichtbron P homogeen verlicht. Achter de houder draait een door een motor M met regelbaar toerental aangedreven schijf W, waarin een aantal smalle radiale spleten zijn aangebracht. Het door de spleten doorgelaten licht wordt door een lens L op een fotocel C geconcentreerd. De fotostroomen worden via een versterker V en een luidspreker U in geluid omgezet. Daar de spleten bij het wentelen der schijf W telkens opnieuw de (in poolcoordinaten) uitgesneden trillingsvorm aftasten, heeft het verkregen geluid ook deze trillingsvorm, hetgeen met de kathodestraaloscillograaf O wordt gecontroleerd. Vóór de malhouder H_1 is nog een tweede, draaibare, houder H_2 aangebracht, waarin een tweede mal kan worden gezet.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

geluid" één der componenten laten verdwijnen door de desbetreffende mal te bedekken, of haar fase veranderen door de mal te draaien.

Op deze wijze werd een periodieke impuls onderzocht, waarvan in *fig. 6a* een oscillogram en het spectrum is weergegeven. De grondfrequentie bedroeg 200 per/sec. Deze trilling werd waargenomen als een scherpe klank van toonhoogte 200 per/sec. Door nu aan het geluid met behulp van een tweede mal een trilling met de grondfrequentie in tegenfase met de grondtrilling van de periodieke impuls en met geschikte amplitude toe te voegen, kon de grondtrilling uit het objectieve (buiten het oor aanwezige) geluid verwijderd worden, zie fig. 6*b*. De waargenomen toonhoogte van de scherpe klank bleef dezelfde. Wil men dit door de onderstelling van niet-lineaire vervorming in het binnenoor verklaren, dan zou het nu mogelijk moeten zijn om de grondtoon, door de grondtrilling in geschikte fase en amplitude weer toe te voegen, alsnog subjectief te compenseeren, zoodat dan de toonhoogte wèl zou moeten veranderen! Deze verwachting werd niet bevestigd, de toonhoogte bleef steeds dezelfde, hetgeen des te merkwaardiger is, waar een subjectieve compensatie wel degelijk mogelijk blijkt bij het onderzoek van de tweede en hoogere harmonischen: de afzonderlijke gewaarwording hiervan — die bij deze proeven bijzonder fraai mogelijk is door afwisselend bedekken en vrijgeven van de bijbehoorende mal — kan men geheel doen verdwijnen (zie fig. 6*c*). Bij niet te hoog geluidsniveau blijkt de subjectieve compensatie dezer hoogere harmonischen precies gelijktijdig op te treden met de objectieve compensatie, zoodat hier de niet-lineaire vervorming geen noemenswaardige rol kan spelen.

De hypothese van het residu

Proeven met de genoemde periodieke impuls, bij een geluidsniveau, waarbij volgens het bovenstaande zeker geen niet-lineaire vervorming optreedt, brachten nu het volgende merkwaardige gedrag aan het licht. Ongeacht het al of niet aanwezig zijn van de grondtrilling blijft een sterke, scherpe klank met een toonhoogte van 200 per/sec onveranderd waarneembaar. Toevoegen en weer verwijderen van de grondtrilling hooren wij echter onafhankelijk van de scherpe klank als het optreden en weer verdwijnen van een zwakke, zuivere toon met de toonhoogte 200 per/sec. Dit is de afzonderlijk waargenomen grondtoon, immers hij verdwijnt exact, wanneer de grondtrilling objectief wordt gecompenseerd. Ook de luidheid, waarmee we de grondtoon nu in het totale geluid hooren, is vrijwel dezelfde, als wanneer we de grondtoon apart beluisteren door de mal van de impuls te bedekken.

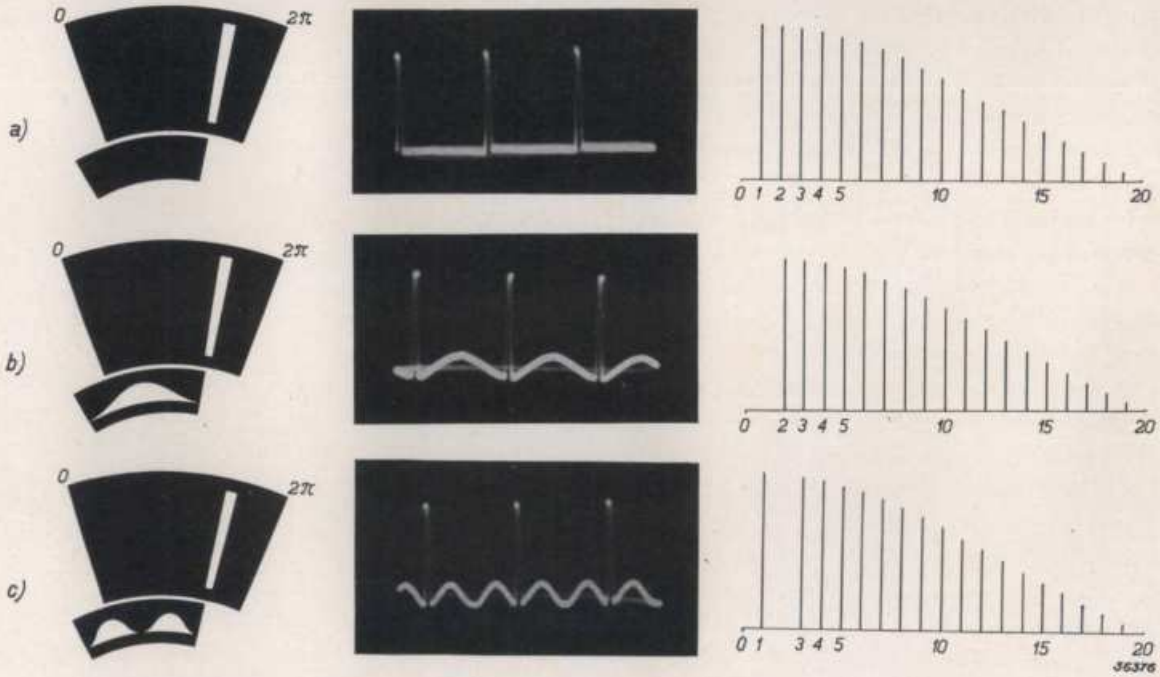


Fig. 6. Uitgesneden mal, trillingsvorm (oscillografisch opgenomen) en spectrum van
a) een periodieke impuls, waarvan de pieken een breedte van 1/20 der periodenlengte hebben;
b) dezelfde periodieke impuls met (objectief) gecompenseerde grondfrequentie;
c) dezelfde periodieke impuls met gecompenseerde tweede harmonische.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

Verder worden bij toevoegen van een extra frequentie van bijv. 204 per/sec zwevingen van de grondtoon gehoord, die volkomen verdwijnen, wanneer deze gecompenseerd wordt. De scherpe klank van dezelfde toonhoogte, die men steeds blijft hooren, vertoont daarentegen géén zwevingen met de toegevoegde frequentie van 204 per/sec.

Het totale geluid bevat dus twee componenten van dezelfde toonhoogte. Dat dit verschijnsel tot dusver aan de aandacht van de waarnemers heeft kunnen ontsnappen, moet worden toegeschreven aan de moeite, die het kost om de grondtoon zonder de hierboven beschreven hulpmiddelen als aparte zwakke component in de klank waar te nemen.

Wat nu de sterke, scherpe klank van toonhoogte 200 per/sec betreft, deze blijkt ook dan onveranderd te blijven bestaan, wanneer niet alleen de grondtrilling, doch zelfs een aantal lage harmonischen uit het geluid worden verwijderd. Hij vermindert echter sterk, wanneer de hoogste harmonischen aan het geluid worden ontnomen. Wij moeten dus in deze scherpe klank de collectieve waarneming dezer hooge harmonischen zien. Een dergelijke klankcomponent willen we een residu noemen.

Door de invoering van het residu vinden de problemen van de subjectieve klankanalyse een zeer eenvoudige oplossing. Voor samengestelde klanken geldt dan de voor de hand liggende, hierboven ook reeds als vanzelfsprekend onderstelde regel, dat hieraan de toonhoogte wordt toegekend van de meest luide component van de klank [4]). Voor alle klanken, welke een groot aantal harmonischen bevatten, zal het residu de component zijn, welke de toonhoogte bepaalt [5]); de grondtoon zelve speelt dan een volkomen ondergeschikte rol. Ontbreekt deze nagenoeg, zooals bij de klinker A of de g van de viool, of wordt hij weggenomen, zooals in de telefonie of de hierboven beschreven proeven, dan blijft het residu ongewijzigd bestaan, zoodat de toonhoogte dezelfde blijft.

Voor deze klanken — en dat zijn er tenslotte zeer vele — is het niet langer zinvol te zeggen, dat het oor een Fourier-analyse van het geluid uitvoert. Dit geldt wel voor de lagere harmonischen, doch de meest op de voorgrond tredende component: het residu, dankt juist zijn bestaan aan het feit, dat de groep hoogste harmonischen niet in verschillende zuivere tonen geanalyseerd wordt, maar als één klank wordt waargenomen.

[4]) Eventueel kan de toe te kennen toonhoogte ook bepaald worden door die component, die krachtens contrast met voorgaande klanken of anderszins het sterkst de aandacht trekt.

[5]) In principe bestaat ook de mogelijkheid, dat in één klank verschillende residuen optreden.

Correlatie van residu en periodiciteit

Dat de hoogste harmonischen niet afzonderlijk kunnen worden waargenomen, is niet verwonderlijk, aangezien deze zeer dicht bij elkaar komen te liggen; het oplossend vermogen van het oor is klaarblijkelijk niet voldoende om ze te scheiden. De vraag rijst echter, waarom zij tezamen juist een component van zoo lage toonhoogte vormen. Er zijn twee grootheden, die bij de verklaring van dit gedrag een rol zouden kunnen spelen: in de eerste plaats de onderlinge afstand der harmonischen, welke gelijk is aan de grondfrequentie; in de tweede plaats de periodiciteit van de gezamenlijke trillingsvorm dezer harmonischen. Bij vrijwel alle trillingsvormen is deze periodiciteit (dwz. de daarmee overeenkomende frequentie) wederom gelijk aan die van de grondtrilling: zoo is bij de door ons gebruikte periodieke impuls (fig. 6*a*) zoowel de onderlinge afstand der harmonischen als de periodiciteit van eenige groep naburige harmonischen 200 per/sec. Men kan echter ook trillingsvormen verwezenlijken, waarbij de twee genoemde grootheden verschillen. De als voorbeeld in *fig. 7a* weergegeven trilling heeft dezelfde spatieering der harmonischen als de periodieke impuls in fig. 7*b*, de periodiciteit, zoowel van de totale trilling als van iedere groep naburige harmonischen, is daarentegen in het tweede geval tweemaal zoo groot als in het eerste. Bij het beluisteren van deze trillingen met behulp van de optische sirene bleek nu, dat het waargenomen residu in het tweede geval een octaaf hooger was dan het residu in het eerste geval. De toonhoogte van het residu is dus niet gecorreleerd met de afstand der harmonischen, maar met de periodiciteit van de gezamenlijke trillingsvorm der samenstellende harmonischen.

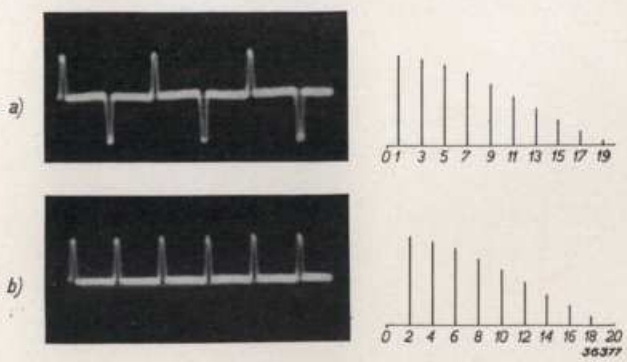


Fig. 7. Oscillogram en spectrum van twee trillingen, die dezelfde afstand der harmonischen hebben, doch verschillende periodiciteit.

Hoe is het bestaan van het residu physiologisch te begrijpen?

Voor de theorie van het mechanisme van het

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

hooren is de meest belangrijke consequentie van het bestaan van het residu deze, dat beweging van eenzelfde gebied van het basilair membraan aanleiding kan geven tot gewaarwordingen van zeer uiteenloopende toonhoogte. De frequenties 2000, 2200, 2400 per/sec enz. afzonderlijk zullen nl. de gewaarwording van zuivere tonen met toonhoogten 2000, 2200, 2400 per/sec enz. veroorzaken. Tezamen echter zullen zij een scherpe klankgewaarwording met een toonhoogte 200 per/sec teweegbrengen. Dit beteekent, dat voor het toekennen van toonhoogte niet de plaats van beweging op het basilair membraan (rangnummer van de geprikkelde zenuwvezels) doorslaggevend is. Wij moeten veeleer de zenuwvezels het vermogen toeschrijven, naast de kwantiteit der prikkeling (luidheid) ook de kwaliteit (toonhoogte) over te brengen.

Dat dit van zenuw-physiologisch standpunt bekeken zeer wel mogelijk is, leert ons een vergelijking met het oog. Hierbij moet men het basilair membraan als het analogon van het netvlies beschouwen. Het acoustische systeem in het binnenoor speelt in het optische analogon de rol van een spectroscoop, die trillingen van verschillende frequenties „afbeeldt" op verschillende plaatsen van het netvlies. In de oude opvatting wordt nu het oor gedacht als een kleurenblind oog, dat in de spectroscoop kijkt: het kan uit de plaats der lijnen, bijv. met behulp van een schaalverdeeling, de frequentie vaststellen. Volgens de door het residu noodzakelijk gemaakte opvatting moeten wij ons echter het oor denken als een kleurenziend oog, kijkende in dezelfde spectroscoop. Dit oog zal, ongeacht de plaats der lijnen, uit de kleur een conclusie kunnen trekken omtrent de frequentie van het licht. Dit oog zal zelfs in een roosterspectroscoop, waarbij spectra van verschillende orde door elkaar kunnen loopen, bijv. een roode lijn kunnen herkennen op een plaats, waar gemeenlijk uitsluitend blauwe lijnen zichtbaar zijn. In acoustische taal: een component van lage toonhoogte (het residu) kan afkomstig zijn van een gebied van het basilair membraan, dat bij zuivere tonen gewaarwordingen van hooge toonhoogte teweegbrengt.

Wij zullen hier niet nader ingaan op de vormen, waarin men zich een dergelijke „kleurzin" van het oor verwezenlijkt zou kunnen denken [6]). Wel echter willen we nog laten zien, dat de geldende opvattingen over een locale prikkeling van het basilair membraan in principe de mogelijkheid openlaten, dat in deze prikkeling een periodiciteit van de som van een aantal harmonischen als wezenlijke grootheid optreedt.

Hiertoe beschouwen we een mechanisch model van het basilair membraan, dat bestaat uit een systeem mechanische resonatoren van oploopende eigenfrequentie (een soort harp). Eenvoudigheidshalve onderstellen we, dat de gevoeligheid van alle resonatoren dezelfde is en dat de breedte der resonantiekrommen voor alle resonatoren eenzelfde percentage van de eigenfrequentie bedraagt, zie *fig. 8a*. Op dit systeem moge een ideale periodieke

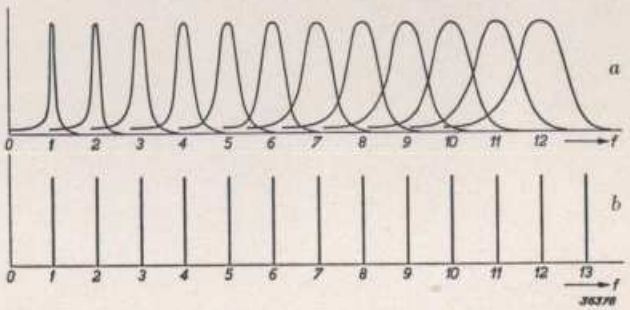


Fig. 8. *a*) Resonantiekrommen van een reeks resonatoren van het model voor het basilair membraan. Men kan zich de resonatoren oneindig dicht op elkaar volgend denken.
b) Spectrum der harmonischen van een ideale (oneindig smalle), periodiek herhaalde impuls.

impuls werken; het spectrum hiervan is in fig. 8*b* weergegeven. Ieder der harmonischen zal nu een heel gebied van resonatoren in beweging brengen in een mate, die gegeven wordt door de excitatiekrommen, welke men gemakkelijk uit de fig. 8*a* en *b* kan afleiden. In *fig. 9* zijn links deze excitatiekrommen voor de eerste 20 harmonischen geteekend, in een logarithmische frequentieschaal. Voor hoogere harmonischen gaan de excitatiekrommen steeds meer over elkaar vallen, of, anders uitgedrukt: één resonator zal gelijktijdig reageeren op een steeds grooter aantal naburige harmonischen. Fig. 9 laat nu zien, dat voor lage frequenties, waar de excitatiekrommen nog niet noemenswaard over elkaar vallen, gebieden van prikkeling afwisselen met gebieden, waarin de prikkeling nagenoeg nul wordt. De geprikkelde resonatoren trillen hier vrijwel sinusvormig. Bij hooge frequenties echter gaat de scheiding der gebieden verloren en de resonatoren vertoonen nu trillingsvormen, waarin de grondperiode van de periodieke impuls duidelijk tot uiting komt en die dus juist de periodiciteit bezitten van de grondtoon.

Zou dus het overbrengend mechanisme (de zenuwen) in staat zijn om deze periodiciteit te onderscheiden, dan ware daarmede het bestaan van het residu zoowel als zijn toonhoogte verklaard. In *fig. 10* geven wij tenslotte voor een periodieke

[6]) Zie hiervoor: J. F. Schouten, Proc. Kon. Ned. Acad. Wet. Amsterdam **41**, 1086. 1938; **43**, 356, 1940 en **43**, October 1940 (nog niet verschenen).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

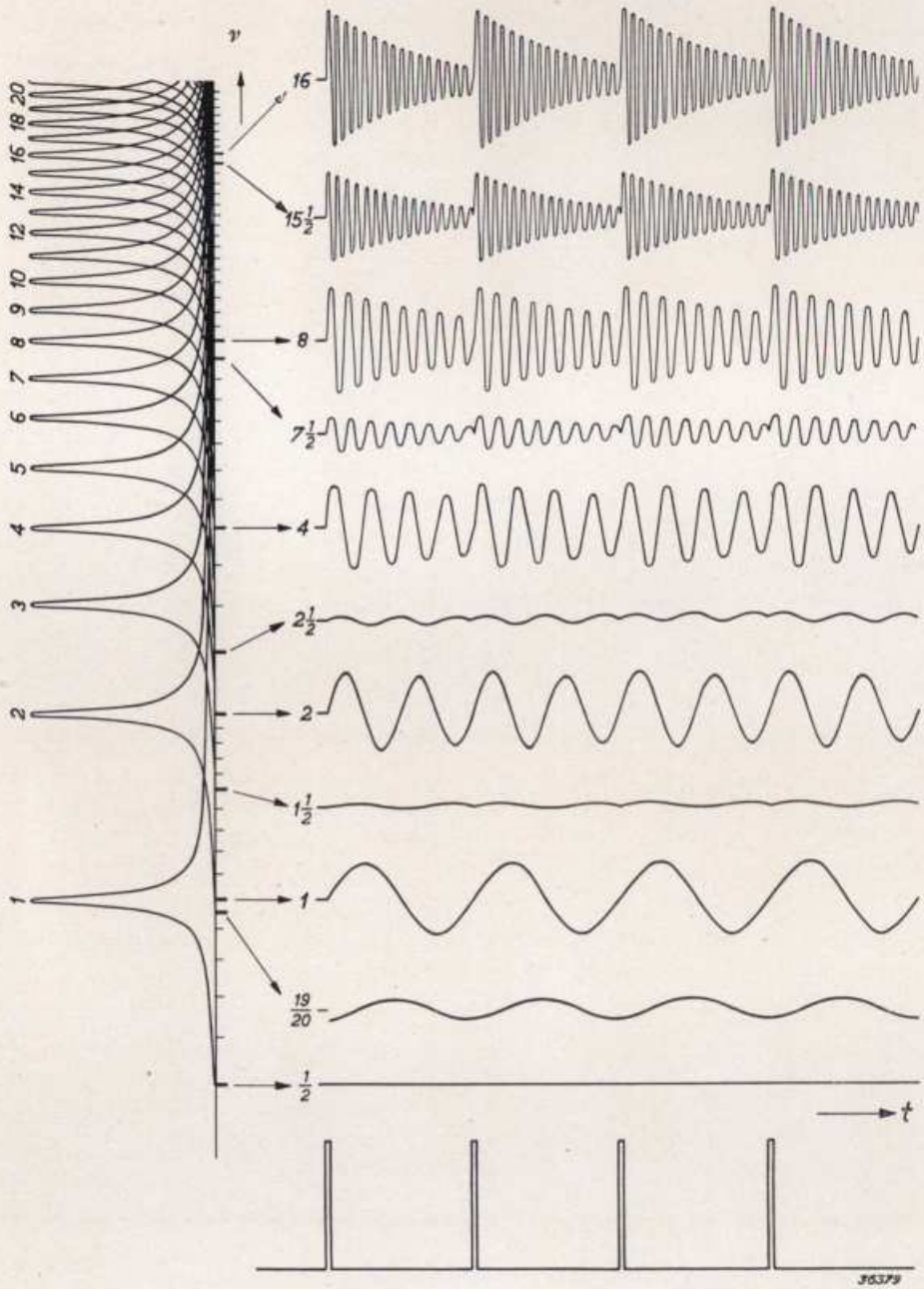


Fig. 9. Links op een logarithmische frequentieschaal de excitatiekrommen, welke voor elke harmonische van de op het model werkende kracht (periodieke impuls) aangeven, welke resonatoren (eigenfrequentie ν) in beweging worden gebracht en in welke mate. De ontstane beweging is hier voor een aantal resonatoren (relatieve eigenfrequentie $^1/_2$, 19/20, 1, $1^1/_2$, 2, $2^1/_2$, 4, $7^1/_2$, 8, $15^1/_2$ en 16) geteekend. Men ziet, dat in het gebied der hoogere harmonischen, waar de excitatiekrommen sterk over elkaar vallen, de trilling van alle resonatoren duidelijk de periodiciteit van de grondfrequentie vertoont.

impuls van bepaalde breedte een vergelijking van het objectieve geluidspectrum, de excitatie van het systeem van resonatoren (het basilair membraan) en de componenten der subjectieve analyse.

Toepassingen van de hypothese van het residu

Wij zullen nu nog enkele merkwaardige verschijnselen bespreken, waarbij de hypothese van het residu toepassing kan vinden.

Anharmonische klanken

Terwijl bij strijk- en blaasinstrumenten, waarin snaren resp. luchtzuilen als oscillatoren dienen, de frequenties der samenstellende tonen (harmonischen) van een klank geheele veelvouden van de grondfrequentie zijn, is dit niet meer het geval bij muziekinstrumenten met minder eenvoudige oscillatoren. Voorbeelden hiervan zijn het triangel [7])

[7]) Zie op dezelfde plaats als in noot [1]) werd vermeld, fig. 11.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

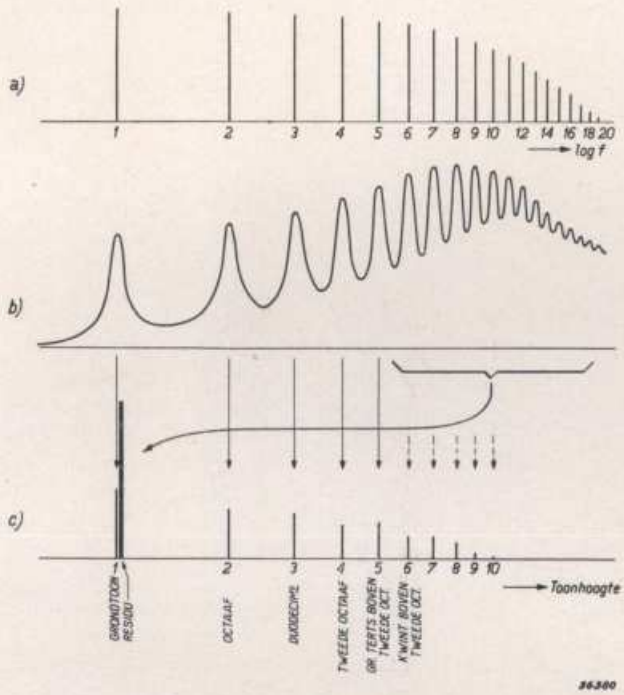


Fig. 10. Schematische voorstelling van het tot stand komen van het subjectieve geluidspectrum.
a) Het objectieve spectrum van een periodieke impuls met een impulsbreedte gelijk aan 1/20 der periodenlengte.
b) De door deze impuls teweeggebrachte prikkeling van het basilair membraan.
c) Het subjectieve spectrum, waarin het oor de door (*b*) weergegeven prikkeling analyseert. De prikkels, afkomstig van die gedeelten van het basilair membraan, waarop de hoogere harmonischen zijn gelocaliseerd, worden gezamenlijk waargenomen als een component van lage toonhoogte, het residu.

en — wellicht het meest beroemde — de torenklok. De klanken hiervan, welker trillingsvorm niet meer zuiver periodiek is, noemt men anharmonisch.

Bij de torenklokken treedt het merkwaardige, overigens reeds lang bekende, verschijnsel op, dat de toon, waarnaar een klok benoemd wordt, de zoogenaamde slagtoon, in het algemeen niet in het spectrum van het klokkengeluid voorkomt. Terwijl men, door stemvorken van de desbetreffende frequenties op geschikte wijze op de klok te plaatsen, deze in ieder van zijn eigenfrequenties in resonantie kan brengen, is dit voor de slagtoon niet mogelijk. In *fig. 11a* geven wij als voorbeeld een klokkenspectrum weer, dat karakteristiek is voor de door de gebroeders Hemony (zeventiende eeuw) gegoten klokken [8]).

Waaraan is nu het bestaan van de slagtoon te danken? Dikwijls is zijn toonhoogte bijna gelijk aan die der tweede eigenfrequentie. Deze is daarvan echter duidelijk te onderscheiden, zoowel door zijn klank — de slagtoon klinkt scherp, metallisch, de eigen tonen klinken week en zuiver — als door het feit, dat de slagtoon (evenals de hooge eigen tonen) betrekkelijk snel, de tweede eigen toon, ook wel „hulptoon" genoemd, slechts langzaam uitsterft [9]). Een andere empirische regel is door Rayleigh opgesteld; we kunnen deze zoo formuleeren, dat de slagtoon een octaaf onder de toonhoogte van de vijfde eigenfrequentie ligt. Ook heeft men de regel willen opstellen, dat de toonhoogte van de slagtoon beantwoordt aan het frequentieverschil van de vijfde en zevende eigenfrequentie, en dit heeft men van physische en technische zijde als reden beschouwd om de slagtoon eenvoudig als een, door niet-lineaire vervorming ontstane, verschiltoon te verklaren. Met name onze landgenoot Arts [10]) heeft echter aan de hand van een uitgebreid feitenmateriaal opnieuw aangetoond, dat de regel van Rayleigh vrijwel steeds veel beter opgaat dan de verschiltoon-regel. Bovendien blijft het bij de verschiltoon-hypothese onopgelost, waarom juist de vijfde en zevende eigen toon een sterke verschiltoon zouden geven en waarom de slagtoon een andere klank heeft dan de overige componenten.

De hypothese van het residu brengt hier eenig

Fig. 11. *a*) Componenten van de klank van een torenklok. De slagtoon is niet onder de eigen tonen der klok te vinden. Wèl ligt zijn toonhoogte meestal zeer nabij die van de tweede eigen toon. De vijfde, zevende en tiende eigen toon vormen een min of meer harmonische reeks, hun frequenties staan nl. tot elkaar vrijwel precies als 2:3:4. De slagtoon is als het residu hiervan op te vatten en ligt derhalve een octaaf onder de vijfde eigen toon.
b) Componenten van de klank van een stalen veer (van een soort Westminster slagwerk). De slagtoon is hier het residu van de derde, vierde en vijfde eigen toon, welker frequenties zich met goede benadering verhouden als 2 : 3 : 4. De slagtoon ligt dus een octaaf onder de derde eigen toon.

[8]) Dit klokkenspectrum heeft voor klokken van verschillende toonhoogte dezelfde samenstelling, wat de intervallen der componenten betreft. Bij het spelen van een melodie op een klokkenspel hoort men dus in iedere klank hetzelfde accoord (in dit geval in hoofdzaak het mineur-accoord van de slagtoon). Van deze eigenschap maakte bijv. Debussy een ver doorgevoerd gebruik voor het nabootsen van klokkenklanken in zijn piano-prélude „La cathédrale engloutie".

[9]) Hier vinden wij dus reeds, met name door P. J. Blessing, Phys. Z. **12**, 597, 1911, duidelijk uitgesproken, het besef van twee gelijktijdig optredende componenten van eenzelfde toonhoogte en verschillende klank, evenals we dit voor grondtoon en residu van de periodieke impuls hebben gevonden.

[10]) J. Arts, J. Acoust. Soc. Amer. **9**, 344, 1938 en **10**, 327 1939.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

licht in. Het is te verwachten, dat, wanneer in een anharmonisch spectrum een aantal frequenties bij toeval geheele veelvouden zijn van een zekere „grondfrequentie", deze laatste als residu hoorbaar wordt. In het geval van de klok, zie fig. 11*a*, is de frequentieverhouding van de 5de, 7de, 10de eigenfrequentie met goede benadering 2 : 3 : 4, deze eigenfrequenties zouden dus inderdaad aanleiding geven tot een residu, waarvan de toonhoogte een octaaf onder de 5de eigen toon ligt. Men kan nu ook begrijpen, waarom bij sommige „leelijke" klokken de slagtoon minder duidelijk is of vrijwel ontbreekt: dit moet het geval zijn, wanneer er in het klokkenspectrum geen enkele reeks van eigenfrequenties te vinden is, die bij redelijke benadering door geheele getallen uitgedrukt kan worden.

Een fraaie bevestiging van deze voorstellingswijze vonden we bij een onderzoek naar de klank van een reeks stalen veeren (een soort Westminster-slagwerk). In fig. 11*b* is een spectrum hiervan gereproduceerd. De slagtoon lag op 1% nauwkeurig een octaaf onder de derde eigen toon. De derde, vierde en vijfde eigenfrequentie hadden hier nagenoeg de frequentieverhouding 2 : 3: 4.

Kunstmatig anharmonisch gemaakte klanken

Het is mogelijk om alle frequenties van een klank met eenzelfde aantal per/sec te verschuiven. Is de klank oorspronkelijk harmonisch, dwz. zijn de frequenties der componenten geheele veelvouden van de grondfrequentie, dan wordt hij door deze behandeling anharmonisch. De proef is gemakkelijk uit te voeren met behulp van een apparatuur voor draaggolftelefonie [11]): Een laagfrequent signaal met frequentie f wordt gemoduleerd op een draaggolf met frequentie ν. De door uitfilteren verkregen frequentie $\nu + f$ wordt gedemoduleerd met een draaggolf met frequentie $\nu - \Delta$, waardoor weer een laagfrequent signaal ontstaat, dat nu de frequentie $f + \Delta$ heeft. Behandelt men op deze wijze de reeds herhaaldelijk gebruikte periodieke impuls met grondfrequentie 200 per/sec en maakt men daarbij $\Delta = 40$ per/sec, dan worden de componenten: 240, 440, 640, ... per/sec.

Welke toonhoogtegewaarwording zal men nu hiervan mogen verwachten? Werd de toonhoogte bepaald door de grondtoon zelve, dan zou zij $\Delta = 40$ per/sec, d.i. een kleine terts, hooger moeten zijn. Werd de toonhoogte bepaald door de verschiltonen, dan zou zij constant moeten blijven, immers de afstand der harmonischen wordt door de verschuiving niet gewijzigd. Geen van beide gevallen treedt in werkelijkheid op: de toonhoogte verandert wel, doch zeer weinig, minder dan een halve toon. Ook bij muziek vonden we een dergelijke geringe verhooging. Deze werd gemeten door vergelijken van twee identieke gramofoonplaten, waarvan de eene met normaal toerental werd afgespeeld en de frequenties een klein bedrag Δ werden verschoven, terwijl de andere zonder frequentieverschuiving werd afgespeeld, echter met zoodanig gewijzigd toerental (dwz. vermenigvuldiging van alle frequenties met een zoodanige factor), dat bij het beluisteren de klanken van beide platen zoo goed mogelijk in toonhoogte overeenstemden. Het resultaat laat zich aldus beschrijven, dat de toonhoogte relatief zooveel verschuift als bij zuivere tonen met frequenties van 1000 à 2000 per/sec te verwachten zou zijn.

Met behulp van het residu is dit gedrag te begrijpen. Stel, dat een residu van toonhoogte 200 per/sec hoofdzakelijk veroorzaakt wordt door de 9de, 10de en 11de harmonische, met frequenties 1800, 2000, 2200 per/sec. Worden deze frequenties verschoven naar resp. 1840, 2040, 2240 per/sec, dan zijn deze frequenties bij benadering op te vatten als 9de, 10de, 11de harmonische van de frequentie 204 per/sec. Het residu verschuift dus van 200 naar 204 per/sec, d.i. procentueel evenveel als bij $\Delta = 40$ de frequentie 2000 per/sec verandert.

Partieele doofheid

Tot slot willen wij nog op een merkwaardige consequentie van het nu verworven inzicht wijzen. Bij storingen van de gehoorzin wordt soms alleen de waarneming van bepaalde frequentiegebieden verzwakt. Iemand, die op deze wijze „partieel" doof is voor alle lage frequenties, bijv. beneden 1000 per/sec, zal de in dit gebied liggende harmonischen niet meer kunnen hooren, wèl echter zal hij een residu met een toonhoogte van bijv. 200 per/sec moeten kunnen waarnemen. Nog paradoxaler is het te verwachten gedrag bij doofheid voor hooge tonen. Aangezien de hooge tonen bij een samengestelde klank het residu doen ontstaan, zal de doofheid voor hooge tonen zich bij beluisteren van scherpe klanken vooral moeten uiten in een verminderd hooren van één der laagste componenten van de klank: het residu. Experimenteel zijn deze te verwachten verschijnselen nog niet onderzocht.

[11]) H. Fletcher, Phys. Rev. **23**, 427, 1923. Hierin werd reeds beschreven, hoe bij niet te kleine waarde van Δ samengestelde klanken van muziekinstrumenten alle muzikaliteit verliezen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

NATUURLIJKE VERLICHTING EN ZICHTBAARHEID DES NACHTS

door P. J. BOUMA. 535.241.44 : 612.843.612 : 628.92.024

In verband met de luchtbescherming is het van belang, de verlichting en de waarnemingsmogelijkheden te kennen, welke des nachts aanwezig zijn tengevolge van de natuurlijke lichtbronnen (maan, planeten, sterren, enz.). Hierover worden enkele gegevens verstrekt. Deze worden vergeleken met overeenkomstige gegevens bij de wettelijk toegestane verduisteringsverlichting.

De jongste tak van de verlichtingskunde, de zg. verduisteringsverlichtingskunde [1]) (ook luchtbeschermingsverlichting genoemd) heeft nieuwe belangstelling doen rijzen voor de vraag, in hoeverre er des nachts nog waarnemingsmogelijkheden bestaan bij volledige afwezigheid van kunstmatige lichtbronnen.

Ter beoordeeling van deze vraag zijn twee soorten van gegevens van belang: gegevens omtrent de lichtgevoeligheid van ons oog, en gegevens omtrent de sterkte van de natuurlijke verlichting, welke des nachts aanwezig is (maan, sterren, planeten, enz.). In het onderstaande zullen wij een kort overzicht van deze gegevens verstrekken.

De absolute drempelwaarden van ons oog

Onder de meest gunstige omstandigheden zijn wij nog in staat om een puntvormige witte lichtbron waar te nemen, welke een verlichtingssterkte van 10^{-9} lux op ons oog veroorzaakt. Speelden de atmosferische invloeden geen storende rol, dan zou men deze verlichtingssterkte kunnen bereiken door een kaars op 32 km afstand te plaatsen (op een 80 m hooge toren, om boven de horizon uit te komen!).

De pupil van het oog (8 mm diameter) vangt onder deze omstandigheden ongeveer $5 \cdot 10^{-14}$ lumen op. Men vergelijke dit met de gevoeligheid van fotocellen: bij het gebruik hiervan moet men reeds zeer bijzondere maatregelen treffen om lichtstroomen van de orde van 10^{-11} lumen te kunnen meten [2]). Nog sterker komt de enorme gevoeligheid van ons oog naar voren, wanneer we berekenen, welke hoeveelheden energie er noodig zijn om nog juist een lichtindruk te weeg te brengen. Gebruiken we monochromatisch licht van de golflengte, waarvoor het aan het donker geadapteerde oog het meest gevoelig is (5100 Å), dan blijkt een vermogen van $4{,}4 \cdot 10^{-17}$ watt of $4{,}4 \cdot 10^{-10}$ erg per sec reeds voldoende te zijn om een lichtindruk op te wekken [3]).

[1]) Zie ook Philips techn. T. **4**, 16, 1939 en **5**, 97, 1940.

[2]) Philips techn. T. **4**, 71, 1939.

[3]) De gevoeligheid van het oog is, in vermogen uitgedrukt, vrijwel dezelfde als die van het oor. De maximale oorgevoeligheid bedraagt 10^{-16} watt/cm² (zie het in noot 4 aangehaalde artikel), terwijl voor het werkzame oppervlak van het oor een waarde van 0,3 à 0,5 cm² wordt opgegeven.

Een erg is ongeveer de hoeveelheid energie, die vrij komt, wanneer we een gewichtje van 1 milligram 1 cm laten vallen. Deze kleine hoeveelheid energie zou, mits volledig omgezet in licht van 5100 Å, in staat zijn om gedurende een tijd van 72 jaar een lichtindruk in het oog te verwekken. We ontvangen dan ruim 100 lichtquanta per seconde. De laagste helderheid, die ons oog onder de gunstigste condities kan waarnemen, bedraagt ongeveer $3 \cdot 10^{-10}$ stilb $= 3 \cdot 10^{-6}$ K/m². Een dergelijke helderheid zou optreden, wanneer we een sneeuwvlakte gingen verlichten met een kaars, die op ca 300 m hoogte is geplaatst; de helderheid van de sneeuw zou dan een factor 30 lager zijn dan tijdens een heldere maanlooze sterrennacht.

Astronomische lichteenheden

Om de lage waarden van verlichtingssterkte, helderheid, enz., welke bij verduisteringsproblemen optreden, te kunnen vergelijken met die, welke 's nachts in de natuur voorkomen, moeten we iets zeggen over de lichteenheden, waarmee de astronomie pleegt te werken. Hier dreigt spoedig verwarring, daar men in de astronomische literatuur een geheel andere nomenclatuur aantreft dan in de lichttechnische literatuur. We beperken ons daarom tot één in de sterrenkunde algemeen gebruikt begrip, nl. dat der grootte-klassen van de sterren en zullen verder de normale lichttechnische nomenclatuur bezigen.

De grootte-klasse van een ster is een logarithmische maat voor de verlichtingssterkte, die de ster op ons oog veroorzaakt, en kan als volgt in verband met de lichttechnische grootheden worden gebracht:

a) Een verschil van 5 grootte-klassen beteekent een factor 100 in de verlichtingssterkte op het oog [4]).

b) Een ster van de eerste grootte geeft $8{,}3 \cdot 10^{-7}$ lux op het oog.

Bedenken we nog, dat de astronoom aan de grootte-klasse een des te grootere waarde toekent

[4]) De grootte-klasse speelt in de astronomie dezelfde rol als de decibel(phoon) in de acoustiek (zie Philips techn. T. **2**, 47, 1937). Een grootte-klasse komt hierbij overeen met 4 decibel.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

naarmate de ster zwakker is, dan kunnen we het verband tusschen grootte-klasse m en verlichtingssterkte E als volgt in formule brengen:

$$m = -14{,}2 - 2{,}5 \log E$$

Enkele voorbeelden geeft onderstaande tabel:

Zon	$m = -26{,}7$	$E = 100\,000$ lux
Volle maan	$m = -12{,}5$	$E = 0{,}2$ lux (1 kaars op 2,2 m afst.)
Venus (maximum)	$m = -4{,}3$	$E = 1{,}1 \cdot 10^{-4}$ lux (1 kaars op 100 m afstand)
Sirius	$m = -1{,}6$	$E = 9 \cdot 10^{-6}$ lux (1 kaars op 330 m afstand)
Ster van de 1e grootte	$m = 1$	$E = 8 \cdot 10^{-7}$ lux (1 kaars op 1100 m afstand)
Ster van de 6e grootte	$m = 6$	$E = 8 \cdot 10^{-9}$ lux (1 kaars op 11 km afstand)
Ster van de 21e grootte	$m = 21$	$E = 8 \cdot 10^{-15}$ lux (1 kaars op 11000 km afst.)

De zon geeft dus 10^{13} maal zooveel licht op ons oog als de zwakste met het bloote oog zichtbare sterren (6e grootte). De machtigste telescopen, geholpen door de fotografie als integreerende factor voegen aan dit gebied van 33 grootte-klassen nog 15 grootte-klassen, of een factor 10^6 toe (21e grootte).

Helderheid van de nachthemel; verlichtingssterkte tijdens een maanlooze, heldere nacht

Tijdens een heldere, maanlooze sterrennacht treedt op een horizontaal vlakje een gemiddelde verlichtingssterkte van ca $3 \cdot 10^{-4}$ lux op. Deze uit metingen op verschillende tijden en op verschillende plaatsen van de aarde afgeleide waarde is nog een factor 10-20 kleiner dan het bij verduistering toegestane verlichtingsniveau [1]). (De in Engeland ingeburgerde uitdrukkingen als „artificial starlight", „starlight lamps" enz. zijn dus minder gelukkig gekozen.)

Waar hebben we deze verlichtingssterkte aan te danken? Men zou geneigd zijn te zeggen: in de eerste plaats aan de vaste sterren, die we overal om ons heen met het bloote oog waarnemen. Merkwaardig genoeg is deze conclusie echter geheel onjuist. In het onderstaande zullen we een schatting maken van de verschillende bijdragen.

a) *Het directe licht van de met het bloote oog zichtbare vaste sterren*

Door stertellingen is bekend, hoeveel sterren van elke grootte-klasse er zijn. Gaat men na, met hoeveel sterren van de eerste grootte elk dezer groepen equivalent is, en telt op deze wijze de lichthoeveelheden van alle sterren tot de 6e grootte tezamen, dan vindt men, dat alle zichtbare sterren tezamen equivalent zijn met 148 sterren van de eerste grootte. Stonden al deze sterren in het zenith, dan gaven ze een verlichtingssterkte van $1{,}23 \cdot 10^{-4}$ lux. Dit getal moet echter gehalveerd worden, daar slechts de helft van de sterren boven de horizon is, en nog eens gehalveerd, daar de sterren over de geheele hemelkoepel verdeeld zijn, zoodat de bijdrage van elke ster met de cosinus van zijn invalshoek (zenith afstand) vermenigvuldigd moet worden. Voor het directe licht van de met het bloote oog zichtbare vaste sterren komen we dus op een totale bijdrage van **$0{,}3 \cdot 10^{-4}$ lux.**

b) *Het directe licht van de vaste sterren, die het bloote oog niet afzonderlijk waarneemt*

Telescoopwaarnemingen leeren ons de verdeeling der vaste sterren over de grootte-klassen kennen, tot de 21e grootte. De bijdrage van nog zwakkere sterren is practisch te verwaarloozen. Alle sterren van de 6e tot de 21e grootte blijken equivalent te zijn met ca 540 sterren van de eerste grootte. Onder toepassing van de genoemde twee correcties vinden we als totale bijdrage tot de verlichtingssterkte: **$1{,}1 \cdot 10^{-4}$ lux.** De „niet zichtbare" sterren leveren dus een 4 maal zoo groote bijdrage als de „zichtbare"!

c) *Het directe licht van de planeten*

Wanneer men de grootte-klassen van de diverse planeten nagaat, zal men op het eerste gezicht tot de conclusie komen, dat hun bijdragen geenszins te verwaarloozen zijn ten opzichte van die der vaste sterren. Immers de grootte-klassen van Mercurius, Venus, Mars en Jupiter bedragen resp.

$$-0{,}9, \quad -4{,}30, \quad -1{,}85, \quad 2{,}29,$$

Gezamenlijk in het zenith staande zouden deze vier planeten een bijdrage geven van $1{,}45 \cdot 10^{-4}$ lux, dus ongeveer evenveel als alle vaste sterren tezamen!

In werkelijkheid geven ze ons een veel kleinere bijdrage, daar ze op onze breedte nooit in het zenith kunnen komen, terwijl bovendien Mercurius en Venus hun hoogste stand nooit gedurende de nachtelijke uren bereiken. De maximale bijdragen van de genoemde planeten gedurende de nacht bedragen op onze breedte ongeveer [5]):

[5]) Mars en Jupiter bij de gemiddelde oppositie, Venus en Mercurius bij hun gunstigste schijngestalten, voor zoover deze op kunnen treden tenminste 1 uur na zonsondergang.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

Mercurius $4 \cdot 10^{-7}$ lux, Venus $4{,}8 \cdot 10^{-5}$ lux, Mars $1{,}1 \cdot 10^{-5}$ lux, Jupiter $1{,}6 \cdot 10^{-5}$ lux,

dus in totaal ongeveer $7{,}5 \cdot 10^{-5}$ lux.

Daar deze maxima, vooral bij Mercurius en Venus, slechts zeer kort optreden, is de gemiddelde bijdrage nog veel geringer, naar schatting ongeveer **$0{,}1 \cdot 10^{-4}$ lux.**

d) Het verstrooide licht van sterren en planeten

De orde van grootte van het gedeelte van het sterrenlicht, dat door de atmosfeer verstrooid wordt, kunnen we schatten door op te merken, dat in ons land de helderheid van de onbewolkte hemel des zomers in het middaguur gemiddeld ongeveer 0,4 stilb is en dus ca 12 600 lux op de aarde zou veroorzaken, dat is ongeveer een achtste gedeelte van de bijdrage, door het directe zonnelicht geleverd. Geldt het zelfde voor het verstrooide sterrenlicht, dan vinden we hiervoor een bijdrage van **$0{,}2 \cdot 10^{-4}$ lux.**

e) Andere oorzaken

De tot dusver opgesomde bijdragen geven een totaal van $1{,}7 \cdot 10^{-4}$ lux, zoodat dus ca **$1{,}3 \cdot 10^{-4}$ lux** aan andere oorzaken is toe te schrijven (zodiacaal licht, noorderlicht, eventueele onbekende oorzaken). Onderstaande tabel geeft een overzicht van de gevonden waarden:

	E	%
a) Direct licht „zichtbare" vaste sterren	$0{,}3 \cdot 10^{-4}$	10
b) Direct licht „onzichtbare" vaste sterren	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	37
c) Direct licht planeten (gemiddeld)	$0{,}1 \cdot 10^{-4}$	3
d) Verstrooid licht sterren en planeten	$0{,}2 \cdot 10^{-4}$	7
e) Andere oorzaken	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$	43

Ca 13% van het licht komt dus direct van de zichtbare lichtbronnen, de andere 87% nemen we waar als helderheid van de nachtelijke hemel zelve. Hieruit berekenen we een gemiddelde helderheid van de nachtelijke hemel van $8{,}4 \cdot 10^{-9}$ stilb, in goede overeenstemming met directe metingen van deze grootheid. Deze helderheid is ongeveer een factor 30 hooger dan de laagste waarneembare helderheid. Zij is de oorzaak van het feit, dat we met het bloote oog slechts sterren tot de 6e grootte kunnen waarnemen, en niet, zooals uit de in de aanhef genoemde drempelwaarde van het oog zou volgen, tot de 8e grootte.

Waarnemingsmogelijkheden bij deze lage helderheidsniveaus

Om een indruk te krijgen van de waarnemingsmogelijkheden bij zeer lage helderheidsniveaus, zullen we enkele grootheden vermelden, die het prestatievermogen van ons oog karakteriseeren, en wel onder drie verschillende omstandigheden:

I) bij volle maan,
II) bij het verlichtingsniveau, dat men bij verduistering nog juist toelaatbaar acht,
III) bij de heldere maanlooze sterrennacht.

De verlichtingssterkten op de grond bedragen voor deze drie gevallen ongeveer:

I) 0,2 lux, II) 0,004 lux, III) 0,0003 lux.

Neemt men aan, dat de gemiddelde reflectiecoëfficient van de aarde ongeveer 15% bedraagt, dan zal het oog van een vlieger zich adapteeren aan de volgende helderheidsniveaus:

I) 10^{-2} K/m², II) $1{,}9 \cdot 10^{-4}$ K/m², III) $1{,}5 \cdot 10^{-5}$ K/m².

De contrastgevoeligheid van het oog onder deze omstandigheden kunnen we het best karakteriseeren door het procentueele contrast, dat groote donkere voorwerpen met de omgeving moeten hebben, om voor den vlieger aan de grens van de waarneembaarheid te komen. Als laboratoriumwaarden vinden we:

I) 16%, II) 46%, III) 74%.

Daar de waarneming in de practijk steeds belangrijk ongunstiger is, kunnen we de volgende conclusie trekken: Groote voorwerpen, die belangrijk donkerder zijn dan hun omgeving, kunnen bij het licht van de maanlooze sterrennacht door den vlieger nooit waargenomen worden; bij het helderheidsniveau II van de wettelijk toegestane verduisteringsverlichting kunnen ze onder zeer gunstige omstandigheden de grens der waarneembaarheid juist bereiken, terwijl bij maanlicht donkere objecten dikwijls waargenomen kunnen worden.

Geheel anders is de situatie voor objecten, die belangrijk helderder zijn dan hun omgeving. Bij verduistering zal men dit geval trachten te vermijden; in de maanlooze sterrennacht zullen dergelijke objecten echter wel optreden. We merken op, dat we, mits ons oog voldoende goed geadapteerd is, onder deze omstandigheden de boomen en de daken van de huizen zeer duidelijk tegen de heldere hemel zien afsteken. De vlieger zal dus ook groote objecten duidelijk waar kunnen nemen, wanneer hun helderheid eenigszins vergelijkbaar wordt met die van de nachtelijke hemel. Dit geval kan optreden bij wateroppervlakken, waarin de hemel weerspiegeld wordt. De practijk leert inderdaad, dat ook in maanlooze nachten de zeekusten, groote plassengebieden, breede rivieren, duidelijk

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

waarneembaar zijn. Zeer lichte wegen (met reflectievermogen van 25-30%) kunnen onder de gunstigste omstandigheden nog juist de grens der zichtbaarheid bereiken.

Omtrent de mogelijkheid van het herkennen van objecten kunnen we opmerken, dat de gezichtsscherpte voor voorwerpen, die een factor 2 helderder zijn dan hun omgeving, voor de drie genoemde helderheidsniveaus ongeveer bedraagt:

I) 4′, II) 40′, III) 1° 50′;

voor voorwerpen, die een factor 10 helderder zijn dan hun omgeving:

I) 2′, II) 20′, III) 55′.

Nemen we aan, dat in de practijk deze getallen ongeveer een factor 2 hooger liggen dan de hier genoemde laboratoriumwaarden, dan beteekent dit, dat de vlieger bij maanlicht en een vlieghoogte van 500 meter nog details van 1,2 resp. 0,6 meter kan waarnemen. Bij het niveau II) van de verduisterde stad zal men er zich voor wachten, dergelijke heldere voorwerpen te doen optreden. Bij de maanlooze nacht zullen alleen de voorwerpen, die zeer veel helderder zijn dan hun omgeving, waargenomen kunnen worden. Voor deze voorwerpen zullen dan van 500 meter hoogte details van 16 meter aan de grens der onderscheidbaarheid liggen. Deze schatting klopt met het feit, dat men smalle beekjes niet ziet, breede rivieren daarentegen in hun heele verloop vrij goed kan volgen.

Tenslotte merken we op, dat de verlichtingssterkte, die een puntvormige lichtbron op het oog van den waarnemer moet werpen om aan de grens der zichtbaarheid te komen, bij laboratoriumproeven bleek te zijn:
Bij volkomen donkere achtergrond 10^{-9} lux.
Bij adaptatieniveau I) $3 \cdot 10^{-8}$ lux, II) $6 \cdot 10^{-9}$ lux, III) $2 \cdot 10^{-9}$ lux.

De practijkwaarden liggen ca een factor 6 hooger, dus resp.: I) $1{,}8 \cdot 10^{-7}$ lux, II) $3{,}6 \cdot 10^{-8}$ lux, III) $1{,}2 \cdot 10^{-8}$ lux. Buitengewoon duidelijk zien we uit deze cijfers, dat we, naarmate het algemeene verlichtingsniveau lager wordt, steeds angstvalliger voor het optreden van kleine lichtpuntjes moeten waken: in de maanlooze nacht kan men 15 maal zoo zwakke lichtpuntjes waarnemen als bij volle maan!

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

METING VAN ZEER KLEINE VERLIESHOEKEN

door C. G. KOOPS. 621.317.374 : 621.319.4

Voor verschillende toepassingen op telefoniegebied is het gewenscht over condensatoren en spoelen te beschikken met uiterst kleine verliezen (verlieshoeken van de orde van grootte 10^{-5} à 10^{-6} radialen). Voor het meten van dergelijke kleine verlieshoeken in één der gebruikelijke brugschakelingen heeft men normaalcondensatoren noodig, die zelf practisch geen verliezen hebben. Er wordt hier een normaalcondensator beschreven, waarbij het gelukt is, de verlieshoek tot eenige malen 10^{-6} te beperken. De normaalcondensator heeft het karakter van een zg. driepuntscapaciteit: slechts de capaciteit tusschen twee van de drie electroden is verliesvrij. De beide nevencapaciteiten worden voor de metingen onschadelijk gemaakt door middel van een hulpbrugschakeling en door toepassing van een substitutiemethode. De invloed van het verloopen der onschadelijk te maken capaciteiten wordt met behulp van een tweede hulpbrugschakeling beperkt. Een beschouwing der mogelijke meetfouten leert, dat bij de op deze wijze verkregen meetinstallatie verlieshoeken bepaald kunnen worden met een absolute nauwkeurigheid van $3 \cdot 10^{-6}$.

Wanneer in de wisselstroomtechniek gesproken wordt van zelfinducties en capaciteiten, dan zijn daarmee bedoeld impedanties, waarin de stroom 90° in fase naijlt, resp. vóórijlt ten opzichte van de spanning. Bij de spoelen en condensatoren, bestemd om deze impedanties practisch te realiseeren, is de faseverschuiving steeds een bepaalde, min of meer van de frequentie afhangende, hoek δ kleiner dan 90°. Terwijl bij een faseverschuiving van precies 90° de impedantie geen energie dissipeert, doet zij dit bij kleiner fasehoek wèl, reden waarom men de afwijking van 90° de verlieshoek noemt. Men geeft de verlieshoek meestal door zijn tangens aan; voor kleine waarden van δ is $\operatorname{tg}\delta \approx \delta$ (in radialen).

Overal waar zelfinducties of capaciteiten technische toepassing vinden, zal men trachten, de verliezen, dus de verlieshoek δ, klein te houden. De eischen, die daarbij gesteld worden, zijn zeer verschillend. Bij sterkstroomcondensatoren bijv., die gebruikt worden voor de verbetering van de arbeidsfactor, is men reeds volkomen tevreden, wanneer de verlieshoeken maar niet grooter zijn dan eenige malen 10^{-3} of 10^{-2}. Gezien de overige in sterkstroominstallaties optredende verliezen speelt dit energieverlies dan vrijwel geen rol en ook de ermee gepaard gaande warmte-ontwikkeling kan men nog betrekkelijk gemakkelijk de baas worden. In andere gevallen daarentegen, vooral in de telefonie, bij de condensatoren en spoelen voor filters en bij de spoelen voor gepupiniseerde kabels, is het zaak om de verliezen tot het uiterste te beperken. Bij de filter-elementen is dit vooral van belang, om de begrenzing van het doorlaatgebied zoo steil mogelijk te kunnen maken; bij de spoelen voor gepupiniseerde kabels, om de demping van de kabel klein en daarmee de (zonder versterking) te overbruggen afstand zoo groot mogelijk te maken.

Het reduceeren van de verlieshoek dezer spoelen en condensatoren is dan ook een der belangrijkste taken bij het ontwikkelingswerk op telefoniegebied. Dit brengt mede, dat men, om oorzaken van verliezen op te sporen en verbeterde constructies te beproeven, zeer kleine verlieshoeken met groote nauwkeurigheid moet kunnen meten. De installatie, die hiervoor in dit laboratorium is gebouwd, zullen we in dit artikel beschrijven. Daarbij is het gewenscht om eerst kort in te gaan op het wezen van de verlieshoek en eenige in dit verband gebruikte begrippen.

Interpretatie van de verlieshoek

Om de verlieshoek met behulp van bekende begrippen der wisselstroomtechniek te interpreteeren, kan men voor de spoel of de condensator een vervangingsschema opstellen, dwz. een schakeling, die (bij de beschouwde frequentie) dezelfde electrische eigenschappen heeft, echter alleen uit ideale zelfinducties, capaciteiten en weerstanden bestaat (bij een ideale weerstand zijn stroom en spanning precies in fase). Er zijn nu twee vervangingsschema's mogelijk, die we in *fig. 1* voor het geval van een condensator hebben geteekend. In het vectordiagram fig. 1*a* is de stroomvector I ontbonden in twee componenten I_p, I_l, resp. evenwijdig met en loodrecht op de spanningsvector V. Dit vectordiagram kunnen we opvatten als het diagram van een parallelschakeling van een ideale weerstand $R_p = V/I_p$ en een ideale condensator met de reactantie $X_p = V/I_l$. Men ziet, dat

$$\operatorname{tg}\delta = I_p/I_l = X_p/R_p \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

Men noemt $1/R_p$ het effectieve parallelgeleidingsvermogen. Hoe kleiner dit is, hoe meer men het ideale geval ($\delta = 0$) nadert.

In het vectordiagram fig. 1*b* is de spanningsvector V ontbonden in twee componenten V_p, V_l.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

Dit is het diagram van een serieschakeling van een ideale weerstand $R_s = V_p/I$ en een ideale condensator met de reactantie $X_s = V_l/I$. Hiermee wordt

$$\operatorname{tg}\delta = V_p/V_l = R_s/X_s \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

R_s noemt men de effectieve serieweerstand. Voor het ideale geval nadert hij tot nul.

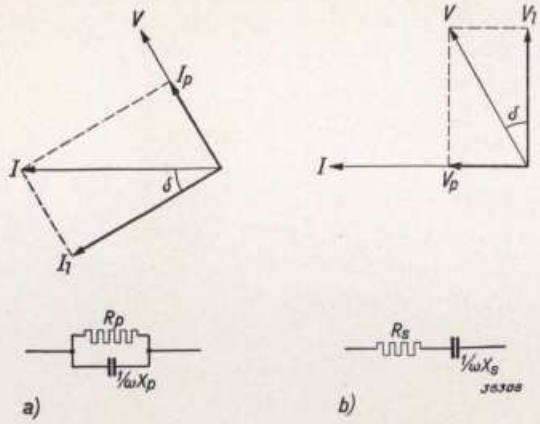


Fig. 1. Het vectordiagram van een condensator met verlieshoek δ kan op twee wijzen geïnterpreteerd worden, die tot twee verschillende vervangingsschema's leiden. De verliezen komen daarbij tot uitdrukking in een bepaald parallelgeleidingsvermogen $1/R_p(a)$ of een bepaalde serieweerstand $R_s(b)$.

Heeft men in de practijk te maken met een parallelschakeling van eenige condensatoren, dan is het vaak gemakkelijk om de voorstellingswijze van fig. 1*a* te gebruiken, aangezien dan eenvoudig alle parallelgeleidingsvermogens $1/R_p$ opgeteld mogen worden, evenals alle „effectieve" capaciteiten $1/\omega X_p$. Bij serieschakelingen is het om analoge reden gemakkelijker om de interpretatie volgens fig. 1*b* te gebruiken. Mutatis mutandis gelden de figuren en benamingen ook voor een zelfinductie.

Indien δ zeer klein is, dwz. slechts zeer geringe verliezen in de condensator resp. de spoel optreden, wordt $I_l \approx I$ en $V_l \approx V$. Dan is dus:

$$X_p = \frac{V}{I_l} \approx \frac{V}{I} \approx \frac{V_l}{I} = X_s = X.$$

In dat geval kan men van een bepaalde, van de frequentie vrijwel onafhankelijke capaciteit $C = 1/\omega X$ resp. zelfinductie $L = X/\omega$ spreken. De grootheden R_p en R_s echter zullen in het algemeen vrij sterk van de frequentie afhangen.

Schakelt men een spoel en een condensator in serie, dan kan men wederom voor elk het schema fig. 1*b* toepassen, en de serieweerstand van het resulteerende vervangingsschema is de som der beide afzonderlijke serieweerstanden R_s. Deze som kan rechtstreeks worden gemeten, wanneer de condensator variabel is en in resonantie gebracht wordt met de spoel; dan zijn immers stroom en spanning in fase. Is nu de waarde van R_s voor de condensator bekend, dan is zij op deze wijze ook voor de spoel gevonden en men ziet, dat men zich bij de opzet van een methode, om de verlieshoek te meten, kan bepalen tot het onderzoek van spoelen òf van condensatoren. Onze meetmethode werd uitgewerkt voor condensatoren, we zullen dan ook in hetgeen volgt uitsluitend van condensatoren spreken.

Algemeene meetmethode

Voor het onderzoek van condensatoren maakt men algemeen gebruik van brugschakelingen, die zeer gevoelige en nauwkeurige metingen veroorloven. In de loop der jaren zijn een groot aantal dergelijke schakelingen uitgewerkt, die elk hun speciale voor- en nadeelen hebben. Eén eigenschap hebben ze echter gemeen: zij leveren als meetresultaat altijd het verschil in $\operatorname{tg}\delta$ van de te onderzoeken condensator en een vergelijkingscondensator. Voor een eenvoudige brug, de zg. gelijkarmige, die in *fig. 2* is weergegeven, zullen we dit toelichten.

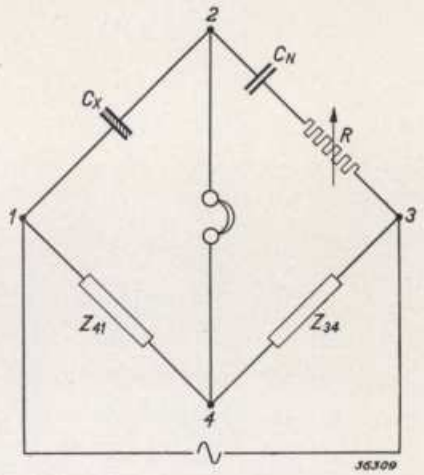


Fig. 2. Gelijkarmige brug voor het bepalen van de verlieshoek van een condensator C_X. C_N is een normaalcondensator. De impedanties Z_{41} en Z_{34} worden gelijk gemaakt, daarna wordt de brug door instelling van C_N en R in evenwicht gebracht.

De te onderzoeken condensator C_X moge een zekere verlieshoek δ_X hebben, de variabele normaalcondensator C_N een verlieshoek δ_N. R is een variabele weerstand, Z_{41} en Z_{34} zijn twee impedanties, die wat betreft de grootte en de fasehoek nauwkeurig aan elkaar gelijk gemaakt zijn. Zet men nu op de punten *1* en *3* een wisselspanning met de frequentie, waarvoor δ_X gevraagd is, dan kan men C_N en R zoo instellen, dat de punten *2* en *4* gelijke potentiaal krijgen. Dit wordt gecontroleerd door middel van een tusschen *2* en *4* aangesloten de-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

tectie-apparaat, bijv. een versterker met telefoon. Bij de juiste instelling is de impedantie tusschen *1* en *2*, wat grootte en fasehoek betreft, gelijk aan die tusschen *2* en *3*, dwz. de effectieve serieweerstanden van beide takken zijn onderling gelijk en evenzoo de effectieve reactanties; dus:

$$R_X = R + R_N,$$

$$C_X = C_N.$$

Hieruit volgt, met verg. (2):

$$\operatorname{tg} \delta_X = R\omega C_N + \operatorname{tg} \delta_N \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Uit de af te lezen grootheden R, C_N, ω kan men dus slechts het verschil $\operatorname{tg} \delta_X - \operatorname{tg} \delta_N$ berekenen. Analoge beschouwingen voor andere brugschakelingen voeren tot een overeenkomstig resultaat.

Om $\operatorname{tg} \delta_X$ te kunnen bepalen, moet dus $\operatorname{tg} \delta_N$ òf bekend zijn, òf zoo klein, dat men deze term in verband met de onvermijdelijke meetfouten mag verwaarloozen. Practisch zal men steeds naar dit laatste streven, omdat $\operatorname{tg} \delta_N$ eenigszins met de temperatuur enz. kan varieeren en men bij groote $\operatorname{tg} \delta_N$ weer voor de noodzaak zou komen te staan om deze schommelingen nauwkeurig te kennen en in rekening te brengen.

Is C_X bijv. een papiercondensator, waarbij $\operatorname{tg} \delta$ eenige malen 10^{-3} of zelfs 10^{-2} kan bedragen, dan kan men als normaal C_N een luchtcondensator of een goede micacondensator gebruiken. Deze hebben een $\operatorname{tg} \delta_N$ van de orde van grootte 10^{-5} à 10^{-4}, hetgeen klein genoeg is om verwaarloosd te kunnen worden, aangezien de verlieshoek van papiercondensatoren met de temperatuur, het vochtgehalte van de lucht enz. zeker wel 5% kan varieeren en het dus geen zin heeft om hem nauwkeuriger te willen meten.

Heeft men echter te maken met kleinere verlieshoeken, dan worden de eischen, die men aan de normaalcondensator moet stellen, zwaarder. In ons geval werd geëischt, dat het mogelijk moest zijn om de verlieshoek van een (variabele) luchtcondensator te bepalen met een absolute onnauwkeurigheid van ten hoogste 10^{-6}. Dit houdt dus in, dat we een normaalcondensator (of, aangezien de meting bij verschillende capaciteitswaarden moest worden gedaan: eenige normaalcondensatoren) noodig hadden met een $\operatorname{tg} \delta_N$, kleiner dan 10^{-6}.

Bouw van de normaalcondensator

Hoe kan men een condensator met dusdanig geringe verliezen verwezenlijken? In feite staan we hier weer voor het probleem, dat het uitgangspunt vormde van deze beschouwingen, nl. de verlieshoek van een condensator tot het uiterste te reduceeren. Het verschil is alleen, dat we voor het construeeren van een normaalcondensator niet in die mate als bij technisch te gebruiken condensatoren en spoelen gebonden zijn door overwegingen als de kosten, de plaatsruimte, enz.

De physische oorzaken van verliezen in condensatoren zijn in hoofdzaak de volgende:

1) De ohmsche weerstand der toevoerleidingen en condensatorplaten, welke reeds bij gelijkstroom een dissipatie zou meebrengen, terwijl bij hoogere frequenties de dissipatie nog grooter wordt door de optredende wervelstroomen.
2) Een geleidingsvermogen van het diëlectricum (isolatieweerstand voor gelijkstroom niet oneindig hoog).
3) Een geleidingsvermogen in beperkte gebieden van het diëlectricum, bijv. in gedeelten met roosterstoringen in kristallen, of in halfgeleidende verontreinigingen in een overigens isoleerend diëlectricum. Deze verliezen manifesteeren zich niet bij gelijkstroom, kunnen echter bij voldoend hooge frequenties een zeer belangrijke rol spelen.
4) Bevat het diëlectricum polaire moleculen, dwz. die permanente dipolen vormen, zooals bijv. de moleculen van water, dan trachten deze in de richting van het aangelegde electrische veld te gaan staan. Bij wisselspanning moeten de dipolen zich dus met de frequentie van de spanning heen en terug draaien. Hierbij ondervinden zij in het medium een soort wrijvingsweerstand, die energiedissipatie tengevolge heeft. Bij zeer lage frequenties (gelijkstroom) verdwijnen deze verliezen, evenzoo bij zeer hooge, aangezien dan de dipolen de wisselingen niet meer kunnen volgen en practisch in rust blijven.

Als men de verlieshoek van een condensator tot het uiterste wil drukken, moet men dus zorgen voor zeer geringe weerstand van aansluitingen en toevoerleidingen en moet men als diëlectricum een stof kiezen, die overal een zeer laag geleidingsvermogen bezit en geen polaire moleculen bevat. Aan deze eischen wordt zeer goed voldaan door droge, stofvrije lucht; de moleculen hiervan zijn niet polair, en de isolatieweerstand is zeer hoog, mits men met de aan te leggen spanning blijft beneden de waarde, waarbij stootionisatie begint op te treden.

Daarmee zijn we echter nog niet klaar. We moeten nu de electroden van onze condensator geïsoleerd van elkaar opstellen. Hierbij moet onvermijdelijk een of ander vast isolatiemateriaal in het electrische veld tusschen de electroden of

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

toevoerleidingen gebracht worden en in dit vaste diëlectricum ontstaan weer verliezen, veel grooter dan die in lucht, zoowel tengevolge van de geringere isolatieweerstand van de vaste stof als door de hierin steeds optredende polarisatie.

Deze verliezen kan men nu onschadelijk maken door het in *fig. 3a* weergegeven principe. De beide electroden zijn geïsoleerd gemonteerd in en geheel omgeven door een metalen huis, dat als derde electrode dient en op een bepaalde potentiaal

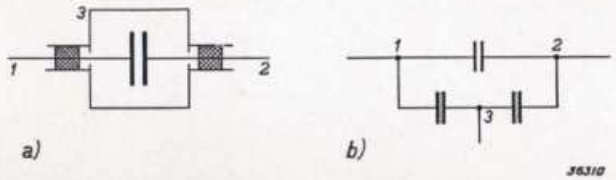
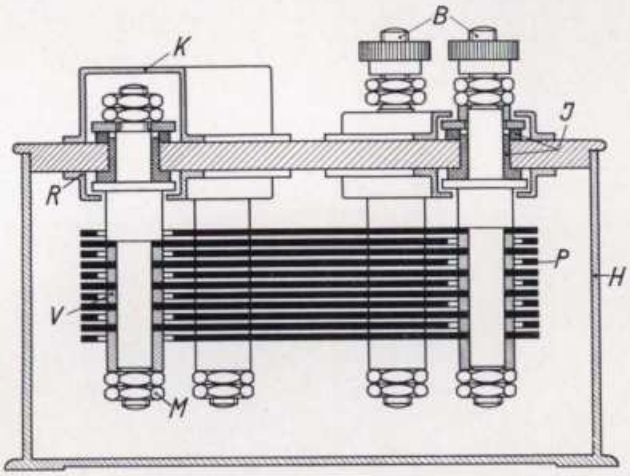


Fig. 3. Principe van de normaalcondensator. De electroden *1* en *2* zijn zoodanig opgesteld (*a*), dat geen lekstroom direct van de eene naar de andere kan vloeien en dat geen krachtlijnen van de eene naar de andere door vast isolatiemateriaal kunnen loopen. Parallel aan de verliesvrije capaciteit *1-2* staan nu de twee niet verliesvrije capaciteiten *1-3* en *3-2* in serie (driepuntscapaciteit, zie *b*). De nevencapaciteiten worden bij de meting op nog nader te bespreken wijze onschadelijk gemaakt.

gebracht kan worden. Er kan nu geen lekstroom van de pool *1* direct naar de pool *2* vloeien, en ook kunnen bij doelmatige constructie vrijwel geen van pool *1* naar pool *2* loopende krachtlijnen ergens vaste stof ontmoeten. De rechtstreeksche capaciteit tusschen de punten *1* en *2* is dus inderdaad nagenoeg geheel vrij van verliezen. Weliswaar hebben we nu twee parallel aan *1-2* geschakelde capaciteiten erbij gekregen (fig. 3*b*), nl. tusschen *1* en *3*, resp. *2* en *3*, die vrij aanzienlijke verliezen kunnen hebben. Door een speciale brugschakeling, die we nog zullen bespreken, kan men echter bereiken, dat van de zg. driepuntscapaciteit *1-2-3* alleen de capaciteit tusschen *1* en *2* in de metingen tot uiting komt.

Fig. 4 laat zien, hoe het beschreven principe is gerealiseerd. De condensatorplaten worden gedragen door twee stellen kolommen, die met een isolatie van hoogfrequentie-„Philite" in de bovenplaat van het metalen huis zijn bevestigd. Essentieel is daarbij, dat op deze bevestigingsplaatsen alsmede op de vrije uiteinden der kolommen nog metalen schutringen en kappen zijn aangebracht, welke met het huis verbonden zijn en aldus zooveel mogelijk het gevaar uitschakelen, dat krachtlijnen tusschen de polen *1* en *2* het „Philite" zouden snijden.

Hebben we op deze wijze het isolatiemateriaal onschadelijk gemaakt, dan blijft er toch nog een plaats over, waar het electrische veld een vast diëlectricum passeert, nl. op de condensatorplaten zelf. Immers, bij de normale hiervoor in aanmerking komende metalen is het oppervlak nooit geheel schoon, maar draagt het steeds een halfgeleidend huidje van oxyde. Men zou dit alleen kunnen vermijden door een edel metaal te nemen, bijv. goud. Dit zou echter, wanneer men massieve platen ge-



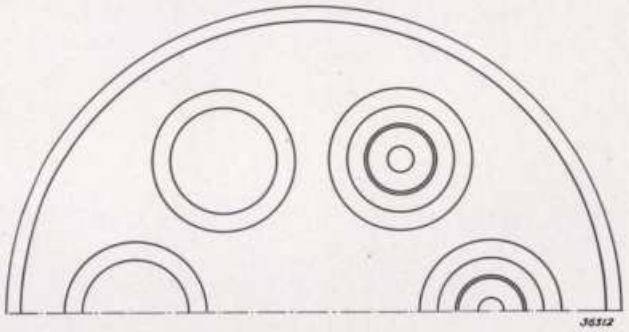


Fig. 4. Constructie van de normaalcondensator. Drie in een driehoek geplaatste kolommen dragen één stel platen *P*, drie andere, in een 60° gedraaiden driehoek staande kolommen het tweede, tusschen de eerste gelegen stel, hetgeen door de detail-figuur verduidelijkt is. De platen worden door vulstukken *V*, die met de moeren *M* worden vastgezet, op de juiste afstand gehouden. De kolommen zijn met een isolatie *I* van hoogfrequentie-„Philite" in het metalen huis *H* (de derde electrode, zie fig. 3) bevestigd. Men lette op de metalen schutringen *R* en kappen *K*, die de isolatie en de vrije uiteinden der kolommen afschermen, om een ongewenscht „krachtlijnenlek" te voorkomen. *B* zijn de twee aansluitklemmen.

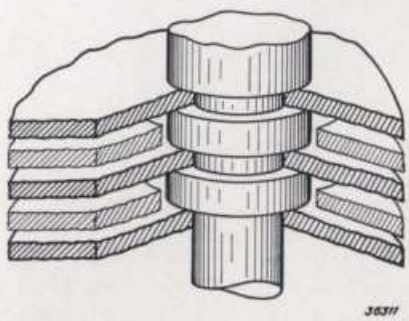


Fig. 4*a*. Detail van de constructie.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

bruikt, veel te kostbaar worden, aangezien de platen ter vermijding van elk microfonisch effect (de capaciteit moet op $10^{-4}\%$ vast liggen!) zeer dik moeten zijn en voor het verkrijgen van de gewenschte capaciteiten een vrij groot plaatoppervlak noodig is. Vergulden van de platen bleek ook niet mogelijk, daar hierbij legeeringen met het onderliggende metaal werden gevormd. Het kwaad van het oxydehuidje kon echter zeer sterk worden beperkt, wanneer men de platen van aluminium maakte of met een aluminiumlaagje bedekte. Weliswaar ontstaat dan een huid van oxyde, deze is echter veel dunner dan bij andere metalen (eenige micron) en heeft dank zij haar slechte geleidingsvermogen slechts een zeer kleine verlieshoek.

Bepaling van de resteerende verliezen der normaalcondensatoren

Welke fout in de bepaling van tg δ zal nu bij de metingen worden gemaakt, wanneer we de eigen verliezen van de normaalcondensator verwaarloozen? Met andere woorden, hoe groot kunnen de verliezen zijn, die de normaalcondensator ondanks de beschreven voorzorgsmaatregelen nog heeft?

De verlieshoek tengevolge van de verliezen in de metalen, dus de gelijkstroomweerstand van kolommen, platen en aansluitingen (alsmede bij hoogere frequentie optredende wervelstroomverliezen) blijft, zooals berekeningen leeren, ook bij de hoogste, ons interesseerende frequentie (8000 per/sec) nog beneden de met onze brug te bereiken meetnauwkeurigheid. Hetzelfde geldt voor de te schatten verliezen in de lucht. We moeten dus alleen nog beschouwen a) de verliezen in de oxydehuidjes, die een verlieshoek δ_a veroorzaken, en b) de nog overblijvende verliezen in het vaste isolatiemateriaal, die aanleiding geven tot een verlieshoek δ_b. De totale verlieshoek van de condensator is dan

$$\delta = \delta_a + \delta_b.$$

(Waar het om zeer kleine hoeken gaat, kunnen we hier steeds de hoek zelf in plaats van de tangens nemen).

Om nu δ te bepalen, hebben we verschillende normaalcondensatoren gemaakt — zooals reeds werd vermeld, hadden wij er toch een aantal noodig —, waarvan de constructie zoodanig verschilde, dat òf δ_a òf δ_b op een bekende wijze veranderd moest zijn. De verschillen in δ voor telkens twee normalen kunnen volgens verg. (3) rechtstreeks worden gemeten, en daarmede worden voldoende vergelijkingen verkregen om alle δ_a en δ_b afzonderlijk te berekenen.

In de practijk werd daarbij als volgt te werk gegaan. Er werden twee normaalcondensatoren C_1 en C_2 gemaakt van 100 pF elk [1]), verder een condensator C_3 van 200 pF. Bij C_1 en C_3 was de plaatafstand 1 mm, bij C_2 was hij 5 mm (C_2 had dus ook een 5 maal zoo groot oppervlak als C_1), terwijl de constructies overigens overeenstemden. Nu kan men gemakkelijk inzien, dat δ_a, mits de oxydehuid veel dunner is dan de plaatafstand, omgekeerd evenredig is met deze laatste. Dus is δ_a voor de condensator C_1 5 maal zoo groot als voor C_2, terwijl δ_b voor beide condensatoren dezelfde waarde moet hebben, daar zij in alle constructiedetails, die δ_b kunnen beïnvloeden, identiek zijn. Door meting van het verschil in δ van C_1 en C_2 kan men derhalve δ_a voor beide condensatoren berekenen. De meting werd uitgevoerd bij 1000 per/sec en bij 8000 per/sec en leverde voor beide frequenties een $\delta_a \approx 5 \cdot 10^{-5}$ voor C_1, en $\delta_a \approx 10^{-4}$ voor C_2. De waarde van δ_a voor C_3 is dezelfde als voor C_1, daar beide dezelfde plaatafstand hebben.

Nu werden C_1 en C_2 parallel geschakeld, zoodat een capaciteit van 200 pF ontstond, die in de brug vergeleken kon worden met C_3. Het parallelgeleidingsvermogen van soort b) is bij C_3 even groot als bij C_1 of C_2, en bij $C_1 + C_2$ het dubbele hiervan. Door de meting van het verschil in δ voor C_3 en $C_1 + C_2$ kon hiermede, aangezien δ_a reeds voor alle drie condensatoren bekend is, ook δ_b voor alle drie berekend worden. De waarde hiervan bleek reeds beneden de meetnauwkeurigheid van onze brug te liggen.

Voor het bestrijken van het geheele gewenschte capaciteitsgebied moest ook nog een normaal van 1000 pF worden vervaardigd; door een meting in verschillende stappen kon hiermee het bovenstaande resultaat getoetst en bevestigd worden.

De totale verlieshoek van de verkregen normaalcondensatoren bedraagt volgens deze uitkomsten eenige malen 10^{-8} en mag dus bij de door ons beoogde metingen, waar een nauwkeurigheid van 10^{-6} gevraagd werd, zeker verwaarloosd worden.

Schakeling van de meetbrug

Uit de beschrijving van de normaalcondensator is wel reeds gebleken, dat onze metingen geheel mis zouden zijn, wanneer we de normaalcondensator zonder verdere voorzorgen op de plaats van C_N in de brugschakeling van fig. 2 zouden brengen. Immers, parallel met C_N zouden dan de beide in serie geschakelde nevencapaciteiten van de normaalcondensator staan (zie fig. 3*b*). Bovendien is het noodzakelijk om de geheele brug, ter vermijding van storende invloeden van buiten af (hand-effect!), met een geaard scherm te omgeven. Hierdoor worden nog belangrijke andere parasitaire impedanties, tusschen punten van de brug en aarde, geïntroduceerd. Wanneer we ook het huis van de normaalcondensator aan aarde leggen, is het voor de verdere behandeling gemakkelijk om de storende, parasitaire impedanties in twee groepen te splitsen: zulke tusschen de brughoekpunten en aarde, en

[1]) De afkorting p (pico) is aequivalent met $\mu\mu$ en beteekent een factor 10^{-12}; 1 pF is dus 1 $\mu\mu$F = 10^{-12} F.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

zulke tusschen punten op een brugtak en aarde. We zullen deze achtereenvolgens beschouwen.

Parasitaire impedanties tusschen de brughoekpunten en aarde

Waarin de fout bestaat, welke door parasitaire impedanties tusschen brughoekpunten en aarde wordt veroorzaakt, kan men als volgt inzien. De brug wordt zoodanig afgeregeld, dat het detectieapparaat zwijgt, en hieruit concludeeren we dan, dat de stroom in de brugtak van *1* naar *2* dezelfde is als die in de brugtak van *2* naar *3*, waaruit dan de voorwaarde van Wheatstone volgt. De conclusie omtrent de gelijkheid der stroomen van *1* naar *2* en van *2* naar *3* gaat echter alleen op, wanneer er van punt *2* geen noemenswaardige stroom naar aarde vloeit, dwz. wanneer er geen parasitaire impedantie tusschen *2* en aarde bestaat.

Men kan nu deze inderdaad aanwezige parasitaire impedantie onschadelijk maken door middel van een hulpbrugschakeling (zg. aarding volgens Wagner), die in *fig. 5* is weergegeven. Het hoekpunt *5* van de hulpbrugtakken wordt geaard, en de impedanties Z_{12}, Z_{23}, Z_{34}, Z_{41} van de vier takken der hoofdbrug, alsmede de impedanties Z_1, Z_3 der hulpbrug worden zoodanig afgeregeld, dat de detector zoowel tusschen *2* en *5* geschakeld, als tusschen *4* en *5*, geen signaal geeft. In dit geval zijn *2* en *4* op aardpotentiaal, er kan dus geen stroom vloeien door parasitaire impedanties tusschen *2* resp. *4* en aarde. De stroom van *1* naar *2* is dus inderdaad gelijk aan die van *2* naar *3*, evenzoo die van *1* naar *4* gelijk aan die van *4* naar *3*, zoodat de vergelijking van Wheatstone geldt:

$$Z_{12}Z_{34} = Z_{23}Z_{41} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

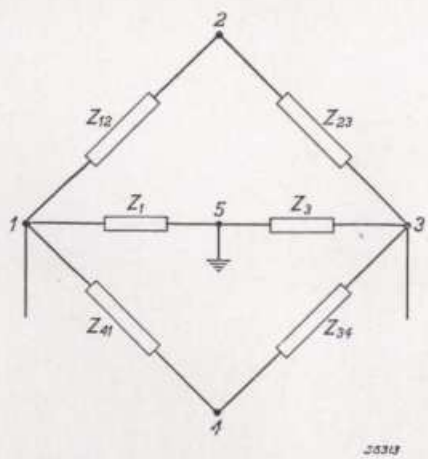


Fig. 5. Hulpbrugschakeling (aarding volgens Wagner). Door afregelen van de (ten deele parasitaire) impedanties Z_1 en Z_3 worden alle parasitaire impedanties tusschen de brughoekpunten en aarde onschadelijk gemaakt.

Tevens moet aan de overeenkomstige voorwaarde

$$Z_{41}Z_3 = Z_{34}Z_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

voor de hulpbrug voldaan zijn, waarbij in Z_1 en Z_3 de parasitaire impedanties tusschen *1* resp. *3* en aarde verdisconteerd zijn. De parasitaire impedanties van alle vier hoekpunten der hoofdbrug zijn dus op deze wijze onschadelijk gemaakt.

Practisch komt de methode hierop neer, dat we in de gelijkarmige brug van fig. 2 nog de takken *5-1* en *5-3* aanbrengen, die ieder uit een variabele condensator met een variabele weerstand parallel bestaan. Door instellen van de condensator en de weerstand kunnen we de totale impedantie tusschen *5* en *1* (dus met inbegrip van de parasitaire!) gelijk maken aan die tusschen *5* en *3*.

Het verloopen der parasitaire impedanties

Nu treedt nog een nieuwe moeilijkheid op: de parasitaire impedanties zijn niet constant. Zij worden immers gevormd door allerlei capaciteiten, vooral die tusschen leidingen, transformatoren, enz. en aarde, die alle groote verlieshoeken hebben; deze verlieshoeken en daarmee ook de effectieve capaciteiten hangen sterk af van de temperatuur en andere omstandigheden. Het gevolg is, dat de instelling van de hulpbrug doorloopend hernieuwd zou moeten worden, of, aangezien dit practisch nauwelijks mogelijk is, dat er steeds een zekere fout Δ gemaakt wordt in het afregelen van de hoofdbrug. Met dit laatste bedoelen we, dat het detectieapparaat tot zwijgen komt, terwijl niet

$$Z_{12}Z_{34} - Z_{23}Z_{41} = 0$$

geldt (verg. 4), maar

$$Z_{12}Z_{34} - Z_{23}Z_{41} = \Delta.$$

Beschouwen we nu de brug fig. 5 nog eens, waarbij we ook de (parasitaire) impedanties Z_2 en Z_4 tusschen *2* resp. *4* en aarde erbij halen (zie *fig. 6*). Men kan dan de algemeene stelling bewijzen: Uit het feit, dat een tusschen *2* en *4* aangebrachte detector zwijgt, mag tot de vergelijking (4) geconcludeerd worden, mits

$$(Z_1Z_{34} - Z_3Z_{41})\,(Z_4Z_{12} - Z_2Z_{41}) = 0 \quad . \quad (6)$$

Dwz. alle parasitaire impedanties van de brughoekpunten zijn onschadelijk, indien we òf

$$Z_1Z_{34} - Z_3Z_{41} = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5a)$$

maken (dit was de hierboven beschreven aarding volgens Wagner), òf

$$Z_4Z_{12} - Z_2Z_{41} = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5b)$$

Is echter bij het instellen van de eerste hulpbrug

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

(Z_1, Z_3) een fout Δ_1 gemaakt en bij het instellen van de tweede hulpbrug (Z_2, Z_4) een fout Δ_2, zodat in plaats van (5*a*, *b*) geldt:

$$Z_1Z_{34} - Z_3Z_{41} = \Delta_1,$$
$$Z_4Z_{12} - Z_2Z_{41} = \Delta_2,$$

dan blijkt de fout in de hoofdbrug evenredig te zijn met deze beide fouten:

$$\Delta \sim \Delta_1 \cdot \Delta_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

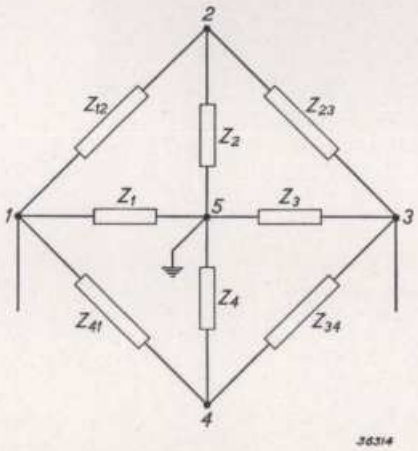


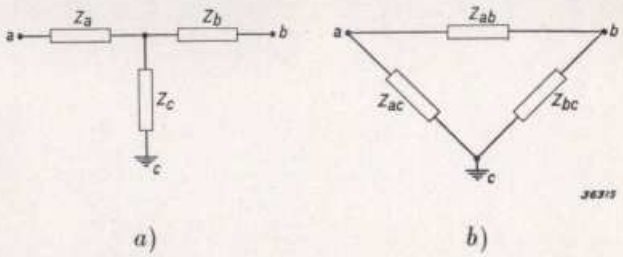
Fig. 6. Geheel symmetrische brug met twee hulpbrugschakelingen. Door afregelen van de (oorspronkelijk alleen parasitaire) impedanties Z_2 en Z_4 wordt ook de invloed van het verloopen aller parasitaire impedanties beperkt.

Bij de eerst beschreven eenvoudige aarding volgens Wagner trachtten we $\Delta_1 = 0$ te maken, lieten echter de fout Δ_2 voor wat hij was. Daaruit resulteerde dan, aangezien Δ_2 aanzienlijke waarden kan hebben, bij de geringste afwijking van Δ_1 dadelijk een aanzienlijke fout Δ. De remedie ligt nu voor de hand: we zullen, terwijl de voorwaarden (4) en (5a) voor het afregelen der brug blijven gelden, tevens nog Z_2 en Z_4 zoo kiezen, dat aan verg. (5b) wordt voldaan, dwz. dat in eerste benadering ook $\Delta_2 = 0$. Z_2 was bij de door ons geconstrueerde brug een vrij groote parasitaire capaciteit; door nu parallel aan de parasitaire impedantie tusschen 4 en aarde nog een variabele zelfinductie met een variabele weerstand in serie te schakelen, kon Z_4 zoodanig ingesteld worden, dat $Z_4Z_{12} - Z_2Z_{41} = \Delta_2 = 0$. Bij het verloopen der impedanties blijven nu beide factoren, die een fout in de instelling der hoofdbrug veroorzaken (verg. 7), voldoende klein.

Parasitaire impedanties tusschen punten in de brugtakken en aarde

Bij de tweede groep van parasitaire impedanties, die tusschen punten op een brugtak en aarde, moeten we weer vooral letten op de nevencapaciteiten van de normaalcondensator. Bij de in fig. 2 weergegeven brug (zie ook fig. 8*a*) bevond zich in één tak de normaalcondensator C_N in serie met de weerstand R, uit welks instelling de verlieshoek δ_X werd berekend. Nu bestaat er tusschen de condensatorpool, die met R is verbonden, en het geaarde condensatorhuis een aanzienlijke parasitaire impedantie. Welke gevolgen kan dit voor de metingen hebben?

De configuratie is van het in *fig.* 7*a* geteekende type. De impedanties Z_a (d.i. de verliesvrije capaciteit C_N) en Z_b (d.i. de weerstand R) vormen samen de brugtak, Z_c is de parasitaire impedantie.



a) *b*)

Fig. 7. De parasitaire impedantie Z_c tusschen een punt op de brugtak *a*-*b* en aarde is aequivalent met twee parasitaire impedanties tusschen de brughoeken *a*, *b* en aarde, waarbij de effectieve impedantie van de brugtak Z_{ab} niet gelijk is aan $Z_a + Z_b$.

Nu is de sterschakeling fig. 7*a* aequivalent met een driehoek, die in fig. 7*b* is aangegeven. De impedantie Z_{ab} is hierin

$$Z_{ab} = Z_a + Z_b + \frac{Z_aZ_b}{Z_c} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

De impedanties Z_{ac} en Z_{bc} zijn op te vatten als parasitaire impedanties tusschen hoekpunten van de brug en aarde, spelen dus bij toepassing der hulpbrugschakelingen geen rol. De effectieve impedantie van de brugtak is gegeven door (8), terwijl we, geen rekening houdende met Z_c, de som $Z_a + Z_b$ als effectieve impedantie hadden beschouwd. Daarbij maken we dus een fout

$$\Delta Z_{ab} = Z_aZ_b/Z_c.$$

Bij onze normaalcondensator van 100 pF is de nevencapaciteit $C_p \approx 80$ pF, derhalve wordt

$$\Delta Z_{ab} = R \cdot C_p/C_N = 0{,}8\ R.$$

Terwijl dus bij onze verliesmetingen R op fracties van een honderdste procent nauwkeurig bepaald moet zijn, moeten we hier een correctie van liefst 80% aanbrengen! Het behoeft wel geen betoog, dat dit de metingen, gezien de inconstantheid van

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

C_p, zeer moeilijk en onbetrouwbaar zou maken.

Deze moeilijkheid hebben we omzeild door toepassing van een substitutiemethode, zie *fig. 8b*. In de brugtak *1-2* worden achtereenvolgens de te onderzoeken condensator C_X en de normaalcondensator C_N gebracht, terwijl de instelbare weerstand R, die in de tak *2-3* met een willekeurige vergelijkingscondensator C_A in serie is geschakeld, telkens zoo wordt geregeld, dat de brug in evenwicht komt. Het verschil der twee waarden van R geeft de effectieve serieweerstand, dus de verlieshoek van C_X. De geschetste moeilijkheid — de parasitaire impedantie tusschen de condensatorpool midden op de brugtak en aarde — treedt bij het verbindingspunt tusschen C_A en R niet op, indien we voor C_A een variabele luchtcondensator van het normale, in den handel verkrijgbare type nemen (C_A moet ongeveer van dezelfde kwaliteit als C_X zijn). Bij deze condensatoren nl., die geen derde electrode hebben, is het huis met de ééne electrode verbonden, zoodat de andere electrode geheel hierdoor wordt omgeven, zie *fig. 9*. Door nu het huis aan het brughoekpunt *2* te leggen en ook de weerstandsbank R met een scherm te omgeven, dat aan het brughoekpunt *3* ligt en dat de verbindingsdraad tusschen C_A en R omgeeft tot vlak bij C_A, bereikt men, dat tusschen het gevaarlijke verbindingspunt en aarde slechts een uiterst geringe capaciteit overblijft.

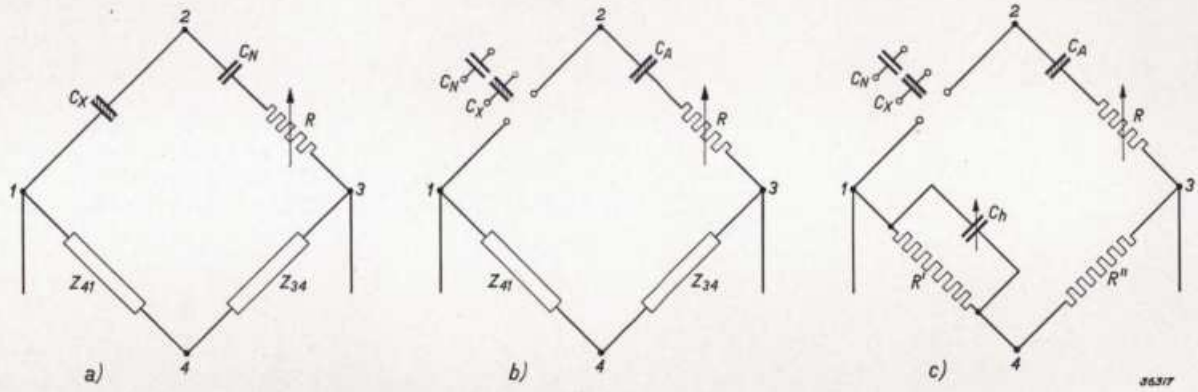


Fig. 8. *a*) Gelijkarmige brug, als fig. 2.
b) Gelijkarmige brug met toepassing van een substitutiemethode. Als vergelijkingscondensator C_A neemt men er een van ongeveer dezelfde kwaliteit als de te onderzoeken condensator C_X. Daar C_N geen verliezen heeft en C_A wel, zouden voor het in evenwicht brengen der brug negatieve waarden van de serieweerstand R noodig zijn.
c) Door voor Z_{41} en Z_{34} twee gelijke weerstanden R' en R'' te nemen en parallel op R' een variabele hulpcondensator C_h aan te brengen, wordt de brug bij positieve waarden van R in evenwicht gebracht.

Bij de practische uitvoering der substitutiemethode moet men er nog om denken, dat, waar C_N géén verliezen heeft en C_A wel, voor het in evenwicht brengen van de gelijkarmige brug een negatieve weerstand R noodig zou zijn. De brug behoeft echter niet per se gelijkarmig te zijn. Nemen we voor Z_{41} en Z_{34} twee gelijke weerstanden R' en R'' en schakelen we dan parallel aan R' een variabele hulpcondensator C_h (fig. 8c), dan kunnen we door regelen van deze condensator de brug zoover uit het evenwicht brengen, dat daarna zoowel bij inschakelen van C_X als van C_N een positieve waarde van R vereischt is voor het herstellen van het evenwicht [2]).

Om bij een capaciteit $C_X = 100$ pF en een frequentie van 8000 per/sec bijv. een verlieshoek $\operatorname{tg}\delta = 3 \cdot 10^{-8}$ te kunnen meten, moet R op 0,005 ohm nauwkeurig ingesteld kunnen worden, bij een totale waarde $R = 200$ ohm. Een dergelijke weerstandsbank is nog goed te verwezenlijken.

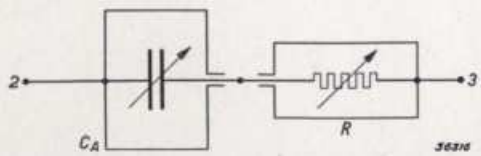


Fig. 9. Is C_A een luchtcondensator van het normale type (tweepuntscapaciteit!), dan kan de parasitaire capaciteit tusschen het verbindingspunt van C_A en R en aarde gemakkelijk zeer klein worden gemaakt.

[2]) Feitelijk zou men ook de weerstand R geheel weg kunnen laten en de brug telkens alleen door regelen van C_h precies in evenwicht kunnen brengen. Het verschil der twee instellingen van C_h, die noodig zijn bij inschakelen van C_X resp. C_N, zou dan $\operatorname{tg}\delta_X$ leveren. Dit is het principe van de zg. brug van Schering. Dat we deze niet toepassen, heeft zijn reden daarin, dat aan de condensator C_h buitensporig zware eischen gesteld zouden worden: hij zou capaciteiten tot 20 pF moeten kunnen krijgen, die op 0,0005 pF nauwkeurig instelbaar zouden moeten zijn!

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

In *fig. 10* geven we tenslotte de volledige schakeling van de brug weer, zooals zij op grond van bovenstaande overwegingen geworden is. In het onderschrift zijn nog enkele details toegelicht.

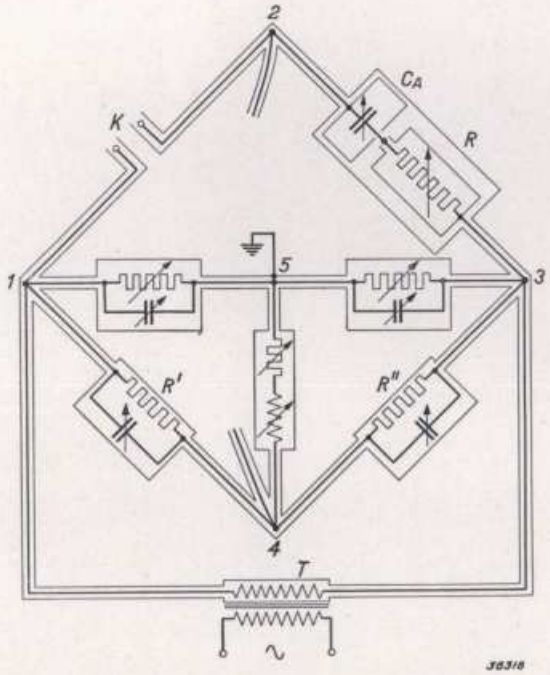


Fig. 10. Volledige schakeling van de door ons gebruikte brug. De brug is ter vermijding van storingen van buiten af geheel omgeven door een geaarde afscherming. Op de klemmen K wordt C_X resp. C_N aangesloten. Men ziet, door welke elementen de af te regelen impedanties Z_1, Z_3 en Z_4 der hulpbrugtakken (zie fig. 6) zijn verwezenlijkt. Behalve op R' staat ook op R'' een kleine variabele hulpcondensator parallel, om het afregelen te vergemakkelijken. De brug wordt gevoed door de afgeschermde transformator T. De niet geteekende detector wordt beurtelings op de punten *2-4*, *2-5* en *4-5* geschakeld.

Meetnauwkeurigheid

Wat de verkregen meetnauwkeurigheid betreft, deze wordt principieel beperkt door de nauwkeurigheid, waarmee de brug ingesteld kan worden op zwijgen van de detector. De instelnauwkeurigheid is hooger, naarmate er een hoogere spanning op de brug gezet wordt en naarmate een grootere versterking in het detectie-apparaat wordt toegepast. Met de spanning kan men niet willekeurig ver gaan met het oog op de beperkte belastbaarheid der weerstanden R' en R'' (fig. 10). Aan de nuttige versterking van het te detecteeren signaal wordt een grens gesteld door het ruischen. Deze grens hebben we zoo hoog mogelijk gelegd door met scherp afsnijdende filters een zeer smal frequentiegebiedje aan weerskanten van de meetfrequentie uit te zeven, zoodat alleen dit kleine stuk van het geheele ruischspectrum als een in sterkte fluctueerende toon in de telefoon hoorbaar kan worden. Hoort men reeds deze fluctueerende toon, dan heeft verdere versterking geen zin meer. De kleinste meetbare impedantie-verandering in de brug is die, waarbij het er door veroorzaakte signaal juist boven de ruischtoon hoorbaar is; het blijkt, dat op deze wijze een verandering in tg δ van $3 \cdot 10^{-8}$ nog juist kan worden waargenomen. Daar de systematische fouten bij de door ons gevolgde substitutiemethode, zooals verschillende proeven hebben aangetoond, zeker kleiner zijn dan de genoemde instelfout van $3 \cdot 10^{-8}$, is dit ook de grens van de absolute nauwkeurigheid, waarmee we een verlieshoek met de beschreven installatie kunnen meten.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLICATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

1502: F. A. Heijn: De wisselwerking tusschen neutronen en materie (II) (Ned. T. Natuurk. **7**, 107-123, Febr. 1940).

In (I) werd in hoofdzaak gesproken over de wisselwerking tusschen snelle neutronen en materie. In deze mededeeling (II) is de wisselwerking tusschen materie en langzame neutronen aan de orde, die van groote beteekenis is door het naar voren treden van de resonantie van atoomkernen. Na enkele theoretische opmerkingen over de werkzame doorsnede van een atoomkern voor het invangen van een langzaam neutron, waarbij blijkt, dat er voor alle kernen een gebied is, waarbij deze doorsnede omgekeerd evenredig met de snelheid van het neutron is, worden methoden aangegeven om neutronen met lage snelheid (van de orde van thermische snelheden) te verkrijgen. Met behulp hiervan zijn resonantieniveaus bepaald, waarvan in een tabel een overzicht wordt gegeven. Over de in sommige gevallen reeds bepaalde breedte van deze niveaus wordt gesproken, alsmede over hun Doppler-verbreeding. In een tabel vindt men een samenvatting van de werkzame doorsneden voor langzame neutronen voor invanging en strooiing. Hierop aansluitend worden enkele waarnemingen betreffende het verstrooiend vermogen van materie medegedeeld, welke uit de verstrooiende eigenschappen van de atoomkernen alleen niet kunnen worden verklaard.

1503: J. L. Snoek: Over de inwendige demping van vaste stoffen (Ned. T. Natuurk. **7**, 133-146, Maart 1940).

Enkele grootheden, die een maat zijn voor de inwendige wrijving in vaste stoffen, worden gedefinieerd en in hun onderling verband beschouwd. Een belangrijke oorzaak der inwendige wrijving bestaat in plaatselijke warmtestroomingen in het materiaal, d.i. het zoogenaamde thermo-elastische effect. In vele gevallen is dit bijna uitsluitend verantwoordelijk voor de waargenomen demping. Deze warmtestroomingen kunnen zich over betrekkelijk groote afstanden uitstrekken (bijv. de dikte van tranversaal trillende staven) of over veel kleinere afstanden (bijv. die van aan elkaar grenzende kristallieten). In alle gevallen zijn de verliezen maximaal bij een frequentie $\nu_k = c\, Da^{-2}$, waar c een constante is van de orde van grootte 1, D de warmtediffusieconstante (warmtegeleidingscoëfficient) en a de gemiddelde afstand tusschen gebieden van tegengestelde temperatuurschommeling (voor transversaal trillende staven is dit de diameter van de staaf, bij longitudinaal trillende staven kan men op andere wijze tot een schatting komen).

1504: W. de Groot: Miscellaneous observations on the rise and decay of the luminescence of various phosphors (Physica **7**, 432-446, Mei 1940).

Met de in **1425** beschreven apparatuur werd het aangroeien en uitsterven van de fotoluminescentie van verschillende kristallen verder bestudeerd. Onderzocht werden kristallen van ZnS-Ag, ZnS-Cu, ZnSCds-Ag, ZnSMnS, $CaWO_4$-Sm, Zn_2SiO_4-Mn_2SiO_4, bij verschillende temperaturen en verschillende golflengten van het bestralende licht. De voor de laatstgenoemde fosfor uit het aangroeien der luminescentie berekende effectieve doorsnede der luminesceerende centra voor aanslag door electronen klopt goed met de volgens gegevens van Nottingham uit de verzadiging der luminescentie afgeleide waarde, terwijl met behulp van diens gegevens ook voor het aantal centra per eenheid van volume een zeer aannemelijke waarde wordt gevonden. Bij de kwantitatieve interpretatie der experimenteel verkregen krommen van het verloop der luminescentie moet de invloed van verschillende oorzaken van vervorming in rekening worden gebracht, o.a. bijv. de verzwakking van het bestralende licht bij het indringen in het kristal. Het effect hiervan wordt berekend. Verder wordt met behulp van een ultramicroscoop het indringen van monochromatische lichtbundels van verschillende golflengten in een éénkristal van ZnSCdS-Ag onderzocht.

1505: J. L. Snoek: Zur Dispersion der Anfangspermeabilität (Physica **7**, 515-518, Juni 1940).

Proeven hebben getoond, dat een preparaat van zorgvuldig gezuiverd ijzer in ontlaten toestand en bij frequenties van 1 per/sec een aanvangspermeabiliteit heeft, welke vele malen grooter is dan de aanvangspermeabiliteit, die men vindt uit metingen van het skin-effect bij frequenties van 10^6 tot 10^8 per/sec. Voor deze discrepantie levert de gangbare theorie geen verklaring.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!